HDZZ CRPA

ZBORNIK RADOVA OSMOG SIMPOZIJA HRVATSKOG DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA

PROCEEDINGS OF THE EIGHTH SYMPOSIUM OF THE CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION

Urednici / *Editors*

Ines Krajcar Bronić
Nevenka Kopjar
Mirta Milić
Gina Branica

Zagreb
2011

Zbornik radova VIII. simpozija
HRVATSKOG DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA

Proceedings of the 8th Symposium of the
CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION

Izdavač / *Published by*

HRVATSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION

Urednici / *Editors*
Ines Krajcar Bronić
Nevenka Kopjar
Mirta Milić
Gina Branica

Tiskara / *Printing House*
Denona
Getaldićeva 1, Zagreb

Naklada / Copies
200

ISBN 978-953-96133-7-0

HDZZ – *CRPA*
Zagreb, 2011

CIP zapis dostupan u računalnom katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem **762554**.

ISBN 978-953-96133-7-0

VIII. SIMPOZIJ
HRVATSKOG DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
s međunarodnim sudjelovanjem
Krk, Hrvatska
13.-15. travnja 2011.

8th SYMPOSIUM OF THE
CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION
with international participation
Krk, Croatia
April 13-15, 2011

Organizator / *Organiser*

HRVATSKO DRUŠTVO ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA
CROATIAN RADIATION PROTECTION ASSOCIATION

Suorganizatori / *Co-organisers*

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb

Institut "Ruđer Bošković", Zagreb
Ruđer Bošković Institute, Zagreb

Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, Zagreb
State Office for Radiological and Nuclear Safety, Zagreb

Pokroviteljstvo / *Under the Auspices of*

Ministarstvo zdravstva i socijalne skrbi
Ministry of Health and Welfare

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta
Ministry of Science, Education and Sports

Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva
Ministry of Economy, Labour and Enterpreneurship

Znanstveni odbor / *Scientific Committee*

Nevenka Kopjar (predsjednica / *chairwoman*)
Tomislav Bokulić
Vera Garaj-Vrhovac
Ines Krajcar Bronić
Jadranka Kovač
Gordana Marović
Đurđica Milković
Saveta Miljanić
Nevenka Novosel
Bogomil Obelić
Mirjana Poropat
Mária Ranogajec-Komor
Marinko Vilić

Organizacijski odbor / *Organising Committee*

Gina Branica (predsjednica / *chairwoman*)
Tomislav Bituh
Zdenko Franić
Goran Gajski
Željka Knežević
Dragan Kubelka
Mirta Milić
Martina Rožmarić Mačefat
Jasminka Senčar
Marija Surić Mihić

Sponzori / *Sponsors*

FOTO BADROV
Hrvatska pošta d.d.
Jamnica d.d.
Knauf Insulation d.o.o
Veleučilište VERN'

Izlagači / *Exhibitors*
Canberra Packard Central Europe GmbH, Austria
CETRON d.o.o., Slovenia
F&J SPECIALTY PRODUCTS, INC., SAD

Dragi članovi HDZZ-a, poštovani sudionici VIII. Simpozija,

Tri su godine prošle od našeg zadnjeg druženja tijekom VII. Simpozija u Opatiji 2008. Vjerujemo da ćemo se ubuduće družiti u dvogodišnjem ritmu svake neparne godine između velikih (svjetskih i europskih) IRPA kongresa.

U proteklom razdoblju HDZZ nije mirovao, naprotiv, Društvo je bilo vrlo aktivno. 2009. godine proslavili smo 30. obljetnicu Društva znanstveno-stručnim skupom na kojem smo dr. sc. Božu Metzgera proglasili prvim počasnim članom HDZZ-a. Organizirali smo 6. sastanak europskih društava za zaštitu od zračenja u Zagrebu i aktivno sudjelovali na 5. i 7. sastanku. U dogovoru s europskim društvima 2009. godine proveli smo prvi natječaj za najbolji znanstveni ili stručni rad iz područja znanosti o zračenju i zaštite od zračenja. Dobitnica nagrade dr. sc. Martina Rožmarić Mačefat uspješno je sudjelovala na europskom natjecanju mladih tijekom 3. europskog IRPA kongresa u Helsinkiju 2010. godine. Ove godine raspisat ćemo drugi natječaj, čiji će pobjednik predstavljati HDZZ u natjecanju tijekom IRPA-13 kongresa u Glasgowu 2012. godine. Sudjelovali smo u organizaciji Znanstvenog simpozija "Aktualna javnozdravstvena istraživanja o izloženosti elektromagnetskom zračenju" (19. 11. 2010. u Zagrebu) i nekoliko sastanaka srodnih društava u Hrvatskoj, a imamo i predstavnika u znanstvenom odboru IRPA-13 kongresa. Organizirali smo nekoliko znanstveno-popularnih predavanja, sudjelovali na IRPA-12 kongresu u Buenos Airesu (2008.) i na 3. europskom IRPA kongresu u Helsinkiju (2010.), na simpozijima regionalnih društava za zaštitu od zračenja i drugih srodnih društava.

Početkom 2009. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju*, znanstveno-stručni časopis sa šezdesetogodišnjom tradicijom izlaženja, postao je službeno glasilo HDZZ-a i u njemu se redovito objavljuju informacije vezane uz rad Društva. Ovom prigodom sve sudionike 8. Simpozija HDZZ-a i članove Društva pozivamo da svoje znanstvene i stručne radove objavljuju u *Arhivu* i time aktivno pridonose njegovom daljnjem napretku. Uredništvu časopisa na razmatranje se mogu poslati i radovi pripremljeni za ovaj zbornik koje, ukoliko dosad nisu objavljivani, možete proširiti do veličine originalnog znanstvenog rada na engleskom jeziku ili stručnog rada na hrvatskom ili engleskom jeziku.

U ovom Zborniku radova objavljujemo sve u roku pristigle radove. Objavljeni radovi odražavaju stanovišta autora, a urednici su ispravili samo očite pogreške u tekstovima, te tehnički uredili i ujednačili izgled radova prema zadanom predlošku. Radovi su pisani ili na hrvatskom jeziku sa

sažetkom na engleskom, ili na engleskom jeziku u cjelini. Kvaliteta i standard engleskog jezika su odgovornost autora jer tekstovi nisu posebno lektorirani. Znanstveni odbor i urednice ovog Zbornika većinu radova autora iz BiH, Crne Gore, Kosova i Srbije ostavili su u originalnom jezičnom obliku, unoseći izmjene samo na mjestima gdje su smatrali da je to nužno. Kvaliteta grafičkih priloga također je odgovornost autora i u pojedinim slučajevima na nju nismo mogli utjecati. To se posebno odnosi na ilustracije koje su originalno u boji, a tisak Zbornika je u crno-bijeloj tehnici. Nakon Simpozija na internetskim stranicama HDZZ-a (www.hdzz.hr) bit će dostupna i pdf verzija Zbornika u kojoj će se svi prilozi moći vidjeti u originalnim bojama.

U Zborniku se nalazi ukupno 80 radova podijeljenih u 7 sekcija; u taj broj ulaze i uvodno predavanje te dva predavanja vezana uz Okrugli stol o akreditaciji metoda i laboratorija u području zaštite od zračenja. Ponosni smo što je upravo u ovom Zborniku sabran najveći broj objavljenih radova u zbornicima od 1992. godine, a posebno nas veseli veliki broj radova mladih članova društva, kao i velik broj radova iz inozemnih prijateljskih društava.

U jeku priprema ovog Simpozija Japan su pogodili potres i tsunami katastrofalnih razmjera što je za posljedicu imalo i velika oštećenja nekoliko reaktora nuklearne elektrane Fukushima. Nuklearna nesreća u Japanu ubrzo je postala jedan od najvećih globalnih problema s još uvijek nepoznatim posljedicama. Nažalost, nedovoljno poznavanje osnovnih činjenica o radioaktivnosti i ponekad pretjerano senzacionalističko izvještavanje u medijima izazvalo je nepotrebnu paniku i u našoj zemlji. Stoga su organizatori odlučili program Simpozija nadopuniti stručnom i znanstveno utemeljenom raspravom u okviru aktualnog sata, s ciljem informiranja javnosti zasnovanog na argumentiranim, stručnim i znanstvenim činjenicama, što je u konačnici i temelj na kojem počiva rad našeg Društva.

I na kraju, nadamo se da će autori radova biti zadovoljni načinom na koji su njihovi prilozi uređeni i prezentirani u Zborniku, a da će čitatelji u ovoj knjizi naći korisne informacije i poticaj za svoj znanstveni i stručni rad u području znanosti o zračenju te zaštite od zračenja.

Nevenka Kopjar, predsjednica ZO 8. HDZZ-a i urednica Zbornika
Ines Krajcar Bronić, tajnica HDZZ-a i urednica Zbornika
Saveta Miljanić, predsjednica HDZZ-a

Zagreb, travnja 2011.

SADRŽAJ

CONTENTS

Uvodno predavanje / *Opening lecture*

V. Chumak, E. Bakhanova 3
Chernobyl experience in the field of retrospective dosimetry

Okrugli stol / *Round Table*

G. Omahen, U. Zdešar 15
Akreditacija i zaštita od zračenja – trebamo li je zbog zakona ili zbog nas
Accreditation and radiation protection – do we need it because of the law or because of us

Z. Franić, S. Galjanić, D. Križanec 21
Iskustva akreditacije laboratorija iz područja znanosti o zračenju u Republici Hrvatskoj
Experiences in accreditation of laboratories in the field of radiation science

Opće teme / *General topics*

D. Kubelka, N. Sviličić, I. Kralik, N. Belamarić, D. Faj, N. Novosel, V. Vukić, Z. Tečić 31
Analiza učinkovitosti i usklađenosti s EU propisima zakonodavstva kojim se regulira radiološka i nuklearna sigurnost
Analysis of efficacy and conformity with the EU acquis communautaire of the radiation protection and nuclear safety legislative

N. Novosel 39
Međunarodna suradnja Republike Hrvatske na području radiološke i nuklearne sigurnosti
International cooperation of the Republic of Croatia in the field of radiological and nuclear safety

M. Nodilo, T. Petković 48
Pojmovnik iz moderne fizike i zaštite od ionizirajućeg zračenja
First Glossary of modern physics and ionising radiation protection in Croatian

M. Medvedec, N. Kovačević, R. Magjarević 54
EMITEL: e-enciklopedija i e-rječnik tehnologija medicinskog oslikavanja
EMITEL: e-Encyclopaedia and e-Dictionary of medical imaging technologies

B. Hanžek, Z. Franić, G. Branica 60
Istaknuti hrvatski prirodoznanstvenici na polju znanosti o zračenju do 1945. godine
Notable Croatian scientists in the field of radiation science until year 1945

Dozimetrija zračenja i instrumentacija / *Radiation dosimetry and instrumentation*

D. Babić 71
Fizikalni principi rada nekih suvremenih detektora ionizirajućeg zračenja
Physical principles of operation of some modern detectors of ionising radiation

M. Osvay 77
Individual monitoring and TL dosimetry in Hungary

M. Ranogajec-Komor, I. Mócsy, I. Csige, Ž. Knežević 82
Mjerenje doze u okolini s TL i RPL dozimetrima
Environmental dosimetry with TL and RPL dosimeters

M. Surić Mihić, D. Posedel, J. Šiško, T. Meštrović, I. Prlić 88
Kalibracija TLD iradijatora prema sekundarnom standardu za K_{air}
TLD irradiator calibration to a K_{air} secondary standard

V. Radolić, D. Čamilović, D. Stanić 94
Kontroler vremena ozračivanja detektora nuklearnih tragova
Time controller for nuclear track etched detectors irradiation

V. Radolić, I. Stanić, I. Miklavčić, D. Stanić 100
Zasićenje brojača iskri pri velikim gustoćama tragova na detektorima nuklearnih tragova LR-115 II
Saturation of spark counter due to high track densities on strippable LR-115 II nuclear track detectors

N. Kovačević, H. Hršak, J. Bibić 106
Dosimetric verification and evaluation of the 3-D conformal parotid gland-sparing irradiation technique for bilateral neck treatment at University Hospital Centre Zagreb

T. Bokulić, I. Mrčela, M. Budanec, B. Vekić, A. Fröbe, Z. Kusić 113
Kalibracija brahiterapijskog izvora ^{192}Ir velike brzine doze: analiza rezultata i nepouzdanosti
High dose rate ^{192}Ir source calibration: analysis of results and uncertainties

Biološki učinci zračenja / *Biological effects of radiation*

M. Milić, R. Rozgaj, V. Kašuba, D. Kubelka, S. Angelini, P. Hrelia 123
Utjecaj polimorfizama gena za popravak DNA na razinu postojanih oštećenja genoma u ljudskim limfocitima izazvanih nakon izlaganja ionizirajućem zračenju od 2 Gy
Influence of SNP polymorphisms in DNA repair genes on the level of persistent damage in human lymphocytes after exposure to 2 Gy of ionising radiation

G. Gajski, Đ. Milković, M. Ranogajec-Komor, S. Miljanić, Ž. Knežević, N. Beck, M. Gerić, V. Garaj-Vrhovac 129
Alkaline comet assay and micronucleus test parameters in children exposed to diagnostic X-ray examination

N. Kopjar, S. Ramić, D. Želježić, I. Prlić 134
Utjecaj radioizotopa ^{201}Tl i ^{99m}Tc primijenjenih u dijagnostičke svrhe na razinu oštećenja genoma u limfocitima periferne krvi – prikaz slučaja
Peripheral blood lymphocyte genome damage induced by diagnostic exposure to ^{201}Tl and ^{99m}Tc: a case study

B. Rakić, J. Pajić, O. Marinković, D. Jovičić, V. Prokić, Z. Mirkov 142
Occupational exposure in nuclear medicine – a case study

A. Ajanović, E. Sofić, M. Mihaljević, D. Hasanbašić, D. Rukavina 148
Promjene koncentracije lecitina u moždanom tkivu čovjeka kod nekih neurodegenerativnih stanja
Changes in lecithin concentration in the human brain tissue in some neurodegenerative conditions

P. Kraljević, M. Vilić, D. Matišić, S. Miljanić, M. Šimpraga 155
Koncentracija bjelančevina i bjelančevinskih frakcija u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih malom dozom gama-zračenja
Concentration of proteins and protein fractions in blood plasma of chickens hatched from eggs irradiated with low level gamma rays

M. Vilić, Ž. Gottstein, S. Miljanić, H. Mazija, P. Kraljević 161
Učinak malih doza gama-zračenja na titar protutijela za virus newcastleske bolesti u pilića lake pasmine
Effect of low dose gamma-radiation upon Newcastle disease virus antibody level in chickens of light line

V. Benković, D. Đikić, A. Horvat Knežević, D. Lisičić, N. Oršolić, N. Kopjar 167
The role of flavonoids as potential radioprotectors

M. Šegvić Klarić, I. Kosalec, M. Milić, S. Vladimir-Knežević, B. Blažeković, N. Kopjar 173
Inhibicija foto-genotoksičnih učinaka UV zračenja na limfocitima periferne krvi čovjeka pomoću ekstrakta vrste *Echinacea purpurea* (L.) Moench
Inhibition of photo-genotoxic effects of UV radiation on human peripheral blood lymphocytes by Echinacea purpurea *(L.) Moench herbal extract*

Izloženost stanovništva zračenju / *Public exposure*

G. Marović, Z. Franić, G. Branica, J. Kovač, J. Senčar 183
Procjena izloženosti zračenju stanovništva RH po regijama
Assessment of population exposure in regions of Republic of Croatia

I. Franulović, G. Marović, T. Bituh, Z. Franić 191
Procjena izloženosti stanovništva Republike Hrvatske unosom ^{90}Sr mlijekom
Exposure assessment of population of the Republic of Croatia from ^{90}Sr uptake by milk consumption

K. Šega, I. Bešlić, G. Marović, J. Senčar 196
Ukupna beta aktivnost frakcije PM2.5 lebdećih čestica u atmosferi Zagreba
Total beta activity in PM2.5 particle fraction in Zagreb atmosphere

S. Kadiri, G. Hodolli, S. Dumani, X. Pllana, F. Hasani 203
Mjerenje radona (^{222}Rn) u prostorijama srednje medicinske škole "Dr. Ali Sokoli" u Prištini
Measurement of radon (^{222}Rn) in the high school of medicine "Dr. Ali Sokoli" in Prishtina

P. Jovanovič 209
Radon measurements in buildings with high radon concentrations

M. Varga Pajtler, D. Jurišić, I. Miklavčić, M. Poje, V. Radolić, B. Vuković, I. Ivković 214
Radon u kućama Virovitičko-podravske županije
Radon in the houses of Virovitica and Podravina County

V. Radolić, I. Miklavčić, M. Poje, D. Stanić, M. Varga Pajtler, B. Vuković 220
Implementacija protokola za mjerenje radona u kućama u RH na primjeru Baranje
Protocol implementation for radon concentration measurements in houses in Croatia – Baranja case

I. Mócsy, I. Csige, K. Szacsvai, M. Ranogajec-Komor, T. Néda 226
Proposal for radon mapping

V. Radolić, I. Miklavčić, M. Poje, D. Stanić, B. Vuković, D. Paar 232
Radon u špiljama Hrvatske – doze koje prime zaposlenici i posjetitelji
Radon concentration in caves of Croatia – assessing effective radon doses for occupational workers and visitors

A. Gregorič, J. Vaupotič 238
Diurnal variation of radon concentration in the Postojna cave

K. Obu, A. Gregorič, M. Smerajec, B. Čenčur Curk, R. Fujiyoshi, Y. Sakuta, J. Vaupotič 243
The influence of air temperature and barometric pressure on radon and carbon dioxide levels in air of a karst cave

Zaštita od zračenja u medicini / *Radiation protection in medicine*

M. Poropat, D. Dodig, M. Ciglar, S. Težak 251
Analiza osobnih doza osoblja u nuklearnoj medicini u desetogodišnjem razdoblju
Analysis of personal dosimetry for nuclear medicine staff in ten-year period

H. Prpić, A. Švarc, B. Vekić, R. Bagarić 257
Zaštita od zračenja tijekom priozvodnje radiofarmaceutika na ciklotronu
Radiation protection during cyclotron production of radiopharmaceuticals

B. Klasić, K. Višković, Z. Brnić, D. Posedel, J. Popić, M. Šoštarec-Crnić 263
Towards establishment of national reference dose levels from computed tomography in Croatia – first results

Z. Brnić, A. Ljevar, B. Klasić, J. Popić-Ramač 269
Image quality in screening mammography in Croatia

O. Ciraj-Bjelac, S. Rafajlović, D. Aranđić, D. Košutić, M. Kovačević 276
Patient dose considerations in interventional cardiology

D. Nikodemová, K. Böhm 282
Optimization of patient doses in interventional radiology and cardiology

N. Beck, Ž. Knežević, Đ. Milković, S. Miljanić, M. Ranogajec-Komor 287
Utjecaj ljudskog čimbenika u zaštiti od zračenja pri snimanju dišnih puteva djece
The role of human factor in radiation protection of children during chest X ray examination

J. Popić-Ramač, Ž. Knežević, Z. Brnić, B. Klasić, A. Hebrang 292
Preliminarni rezultati niskodoznog protokola kompjutorizirane tomografije prsišta kod pacijenata s limfoproliferativnim bolestima
Efficacy of low-dose CT protocol in follow-up of lymphoproliferative disorders – preliminary results

M. Gamulin, M. Grgić 298
Nuspojave adjuvantnog zračenja bolesnika sa seminomom testisa stadija I
Side effects of adjuvant radiotherapy in patients with testicular seminoma stage I

S. Miljanić, I. Bessieres, J.-M. Bordy, E. D'Agostino, F. d'Errico, A. di Fulvio, C. Domingo, Ž. Knežević, P. Olko, M. Silari, L. Stolarczyk, R. Harrison 303
Interkomparacija dozimetara za mjerenje perifernih doza u radioterapiji – aktivnost radne grupe 9 EURADOS-a: zaštita od zračenja u medicini
Intercomparison of dosimeters for non-target organ dose measurements in radiotherapy – activity of EURADOS WG9: radiation protection in medicine

I. Mrčela, T. Bokulić, M. Budanec, Ž. Soldić, A. Fröbe, Z. Kusić 309
Kalibracija optički stimuliranih luminiscentnih dozimetara (OSL) za *in-vivo* dozimetriju u radioterapiji
Calibration of optically stimulated luminescence (OSL) dosimeters for in-vivo dosimetry in radiotherapy

S. Jurković, A. Diklić, M. Kasabašić, Đ. Smilović Radojčić, M. Švabić, A. Ivković, D. Faj 316
Survey of equipment quality control in radiotherapy centers in Croatia: first results

Đ. Smilović Radojčić, M. Švabić, A. Diklić, S. Jurković 323
Kontrola kvalitete terapije zračenjem u KBC Rijeka
Quality control of radiotherapy in University Hospital Rijeka

M. Kasabašić, V. Rajevac, S. Jurković, A. Ivković, H. Šobat, D. Faj 330
Utjecaj pogreške u položaju bolesnika tijekom zračenja zdjelice na raspodjelu doze
Influence of daily set-up errors on dose distribution during pelvis radiotherapy

Radioekologija / *Radioecology*

V. Stibilj, B. Svetek, Z. Trkov, A. Volčanšek, B. Breznik 341
Measurement of ^{14}C activity in exhaust air at the Krško Nuclear Power Plant

B. Obelić, I. Krajcar Bronić, N. Horvatinčić, A. Sironić, J. Barešić, A. Rajtarić, B. Breznik, A. Volčanšek 347
Utjecaj remonta Nuklearne elektrane Krško na aktivnost ^{14}C u atmosferi i bilju
Impact of refuelling of the Krško Nuclear Power Plant on the ^{14}C activity in the atmosphere and plants

G. Pehnec, V. Vađić, I. Bešlić, J. Kovač 355
Mjerenja koncentracija sumporovodika i radioaktivnosti u okolici CPS Molve
Measurements of hydrogen sulphide and radioactivity in the vicinity of the Molve gas station

V. Vađić, G. Pehnec, J. Kovač 362
Razine merkaptana i radioaktivnosti na plinskom polju Molve
Mercaptan and radiation monitoring at the gas field Molve

M. Čačković, V. Vađić, S. Žužul, G. Marović, J. Senčar 368
Sumporov dioksid i ionizirajuće zračenje u okolišu plinskog polja Molve
Sulphur dioxide and ionizing radiation in the environment of gas field Molve

G. Branica, G. Marović, J. Senčar 375
Radioaktivnost na plinskom polju Molve
Radioactivity at natural gas field Molve

D. Pavičić-Hamer 381
Antropogeni radionuklidi u morskoj vodi srednjeg i južnog Jadrana
Anthropogenic radionuclides in seawater of the middle and southern Adriatic Sea

N. Horvatinčić, J. Barešić, A. Sironić, I. Krajcar Bronić, B. Obelić 387
Tricij u oborinama, površinskim i podzemnim vodama na području Zagreba
Tritium in precipitation, surface and groundwaters in the Zagreb area

M. Rogić, L. Benedik, M. Rožmarić Mačefat, M. Štrok 393
Određivanje ^{210}Pb i ^{210}Po u vodama za piće dostupnim na hrvatskom tržištu
^{210}Pb and ^{210}Po determination in bottled water available on the Croatian market

M. Rožmarić Mačefat, L. Benedik, M. Rogić, De. Barišić 399
Određivanje prirodnih alfa radionuklida u komercijalno dostupnoj pitkoj i mineralnoj vodi
Determination of natural alpha emitting radionuclides in bottled drinking and mineral water

D. Todorović, M. Janković, J. Nikolić, D. Košutić 405
Radioactivity of ore sites of lead, zinc and phosphate in Serbia

N. Gradaščević, D. Samek, L. Saračević, A. Mihalj 411
Procjena utjecaja termoelektrane Kakanj na tlo i vegetaciju u bližem okruženju postrojenja
Impact assessment of coal fired power plant Kakanj on the soil and vegetation in surroundings of the facility

P. Vukotić, R. Svrkota, T. Anđelić, R. Zekić, N. Antović 418
Lokalnosti sa povećanim fonom gama zračenja u zoni Visoki krš u Crnoj Gori
Localities with elevated radiation background in the High Karst Zone of Montenegro

M. J. Križman, J. Rojc 424
Decrease of environmental radioactivity after terminated restoration of the uranium mine site at Žirovski Vrh (Slovenia)

M. Štrok, P. Planinšek, B. Smodiš 431
Content of natural radionuclides in sediments in the vicinity of a former uranium mine

B. Skoko, G. Marović, D. Babić, I. Vicković 437
^{137}Cs na znanstveno-istraživačkom poligonu "Šumbar"
^{137}Cs in research polygon "Šumbar"

T. Bituh, I. Prlić, G. Marović, J. Senčar, B. Petrinec 443
Radioaktivnost i moguća iskoristivost fosfogipsa
Radioactivity of phosphogypsum and its possible usage

M. Rožmarić Mačefat, Do. Barišić, M. Rogić, L. Svečnjak, M. Nodilo, D. Bubalo, M. Popijač, N. Kezić 449
Aktivnosti ^{137}Cs u kestenovom medu iz sjeverozapadne Hrvatske dva desetljeća nakon akcidenta u Černobilu
^{137}Cs behaviour in chestnut honey from northwestern Croatia two decades after Chernobyl accident

D. Copplestone, R. Allott 455
The radiological protection of wildlife and its implications

Validacija metoda u radioekologiji /
Validation of methods in radioecology

J. Barešić, I. Krajcar Bronić, N. Horvatinčić, B. Obelić, A. Sironić, J. Kožar-Logar 461
Mjerenje tricija u uzorcima voda tekućinskim scintilacijskim brojačem uz elektrolitičko obogaćenje
Tritium activity measurement of water samples using liquid scintillation counter and electrolytical enrichment

A. Kandić, B. Šešlak, I. Vukanac, M. Đurašević, Z. Milošević 468
Analiza stabilnosti rada HPGe spektrometra u okviru interne kontrole kvaliteta
Analysis of HPGe spectrometer stability – internal quality control

M. Đurašević, I. Vukanac, A. Kandić, B. Šešlak, Z. Milošević 474
Određivanje sadržaja radionuklida u okviru međunarodnih interkomparativnih merenja – IAEA-CU-2008-03 i IAEA-CU-2009-03
Radionuclide content determination within the international intercomparison campaigns – IAEA-CU-2008-03 and IAEA-CU-2009-03

F. M. Gavila 480
The fundamentals of the air sampler calibration-verification process

Neionizirajuća zračenja / *Non-ionising radiations*

G. Serša, M. Čemažar, E. Gadžijev, I. Edhemović, E. Brecelj, M. Snoj 489
Biomedical application of electroporation: electrochemotherapy and electrogene therapy in treatment of cutaneous and deep seated tumors

B. Tanatarec, N. Nikolić 495
Norme u području mjerenja visokofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja u svrhu zaštite od štetnog djelovanja
Standards for measurements in the field of high frequency electromagnetic radiation for the purpose of protection against adverse health effects

D. Poljak, C. Peratta, A. Peratta, A. Šarolić, V. Dorić 501
Dosimetry methods for human exposure to non-ionising radiation

S. Pažanin, A. Šarolić 507
Profesionalna izloženost obalnih motritelja neionizirajućem zračenju
Occupational exposure of coastal observation station personnel to non-ionising radiation

A. M. Marjanović, A.-M. Domijan, D. Flajs, I. Pavičić 513
Pokazatelji oksidacijskog oštećenja makromolekula i antioksidacijske obrane u ispitanika izloženih radarskom zračenju frekvencija od 1,5 GHz do 10,9 GHz
Indicators of macromolecular oxidative damage and antioxidant defence in examinees exposed to the radar frequencies 1.5 – 10.9 GHz

I. Pavičić, A. M. Marjanović, I. Trošić 519
Usporedba djelovanja GSM moduliranog i nemoduliranog radiofrekvencijskog zračenja na stanice
Comparison of GSM modulated and CW radiofrequency radiation on cells

V. Garaj-Vrhovac, G. Gajski 524
Radioprotection of Wistar rat lymphocytes against microwave radiation mediated by bee venom

Popis autora / *Author index* 531

UVODNO PREDAVANJE

OPENING LECTURE

CHERNOBYL EXPERIENCE IN THE FIELD OF RETROSPECTIVE DOSIMETRY

Vadim Chumak and Elena Bakhanova
Research Center for Radiation Medicine AMS Ukraine,
Kiev, Ukraine
chumak@leed1.kiev.ua

INTRODUCTION

The Chernobyl accident, which occurred on April 26, 1986 at the nuclear power plant (NPP) located less than 150 km north of Kiev, is the largest nuclear accident ever. Unprecedented scale of the accident was determined not only by the amount of released activity, but also by a number of population and workers involved and, therefore, exposed to enhanced doses of ionising radiation [1].

The population of the 30-km exclusion zone numbering about 116,000 persons of all ages and both genders was evacuated within days and weeks after the accident. Emergency workers called "liquidators of the accident" or liquidators (males age 20-50) were involved into clean-up and recovery for 5 years and their total number is estimated as 600,000, of whom about 300,000 are Ukrainian citizens [2].

Due to an unexpected and excessively large scale accident, none of residents had personal dosimeters, coverage with personal dosimetry of liquidators was not total, dosimetry techniques and practices were far from the optimum [3].

As a result, an acute need for retrospective dose assessment was dictated by radiation protection and research considerations. This need was responded by implementation of wide scale dose reconstruction efforts, which covered main exposed cohorts and encompassed broad variety of newly developed methods: analytical (time-and-motion), modelling, biological and physical (EPR spectroscopy of teeth, thermoluminescence (TL) of quartz).

The paper summarizes experience of Research Center for Radiation Medicine (RCRM) in the field of retrospective dosimetry of large cohorts of exposed population and professionals. These dose reconstruction projects were implemented, in particular, in the framework of epidemiological studies, designed to follow-up medical consequences of the Chernobyl

accident and study health effects of ionising radiation. The most notable research projects are the Ukrainian-American studies of cataracts [4] and leukemia among liquidators [5]. Due to limited volume of the paper, rather a highlight of the activities in the area of post-Chernobyl retrospective dosimetry will be presented; details of particular studies can be found in relevant literature references.

RETROSPECTIVE DOSIMETRY OF EVACUATED POPULATION

Soon after the accident 89,599 residents of the Ukrainian part of the 30-km exclusion zone were evacuated. The evacuation began on April 27, 1986; in about 36 hours after the accident the population of the ChNPP satellite town of Pripyat was evacuated. None of 49,360 residents of Pripyat had personal dosimeters and their individual doses remained unknown. At the same time, contamination pattern of the town area suggested significant variation of individual doses due to the difference in contamination of various parts of the town and shielding effect of dwellings. In more general terms, the Pripyat case is a good example of exposure of urban population and therefore, dose reconstruction effort had both utility and methodological value. In order to reconstruct individual doses of the residents of Pripyat, a wide scale survey was undertaken in 1988 – 1989 (2 – 3 years after the accident), when evacuees were asked to reconstruct and describe their movements and location before evacuation. Respondents were asked to recall their behaviour with the resolution of one hour in time and a sector (one of eight) in space: whether they stood in- or outdoors, describe radiation protection countermeasures (sheltering, administration of stable iodine pills, sealing windows etc). Another essential source of input data were direct dose rate measurements, which started 1.5 h after the accident and were conducted over the network of 31 monitoring points with average interval 3.5 h and lasted till the end of evacuation of population. Since residential areas in Pripyat were presented by brick and concrete multi-floor buildings, at the first round of dose reconstruction universal shielding factors for brick houses were taken for all individuals.

All together 42,416 residents were interrogated, about 72 % of registered evacuees from both Pripyat and the settlements of the 30-km zone.

Individual doses were estimated to 16,193 evacuees from Pripyat (33 % of pre-accident population) [6]. It was demonstrated that, though varying broadly, individual doses, received by evacuees from Pripyat did not exceed emergency limits, which were in effect in 1986 for general

public [7]. Average dose of Pripyat residents was 10.1 mSv, 95-percentile of dose distribution was 24 mSv. Interestingly, due to evacuation cross highly contaminated spots, residents of Pripyat had received additional 15 – 20 mSv, which was accumulated while their buses had passed to clean areas – a dose comparable to the whole pre-evacuation exposure.

Similarly, doses were reconstructed to the residents of 63 other settlements, who were evacuated between May 2 and 14, 1986. Individual doses were reconstructed to 19,605 persons (about 49 % of pre-accident rural population of the 30-km zone). Since the duration of pre-evacuation stay within their settlements lasted longer than in the case of Pripyat, individual routes and behavior were reconstructed with less resolution – up to one day in time (hours spent outdoors were requested for each day before evacuation) and one settlement in space. Options for the dwelling type included individual one-floor brick and wood-and-clay houses as well as multi-floor brick buildings. The distribution of individual doses to this cohort was broader (due to larger variation of dose rate fields): mean dose was 15.9 mSv, median – 7.8 mSv, 95-percentile – 67.7 mSv.

The second round of dose reconstruction, which was conducted in cooperation with GSF (now – Helmholz Zentrum München), included the following improvements: revision of interpolation of dose rate fields using state-of-the-art geostatistical methods, application of age-dependent conversion coefficients, detailed modelling of typical buildings and estimation of scenario-specific (sky shine, radioactive clouds, deposited radioactivity) location factors using Monte Carlo photon transport calculations, application of stochastic modelling for estimation of individual doses along with their uncertainties. Although there was no significant change of dose estimates, this study [8] had marked significant progress in methodologies for assessment of doses following radiation emergency in urban environment.

RETROSPECTIVE DOSIMETRY OF POPULATION DOWNWIND CHERNOBYL

Doses to the population of the areas downwind Chernobyl release are substantially lower than for evacuated residents of the 30-km zone and are usually estimated on group (age, profession specific average doses) level using radioecological and dosimetric models [9]. However, the doses accumulated during passage of radioactive clouds or caused by short living radionuclides cannot be reliably evaluated by these techniques, which are based on the measurements taken later in time. By this reason, alternative

methods for retrospective dose estimation were sought for. Solution can be offered by TL dosimetry using naturally occurring materials (quartz, feldspar) in fired ceramics [10]. It was found in course of several fieldtrips that such materials (bricks, ceramic insulators, sanitary ceramics) are plentiful in Ukrainian villages at contaminated territories and dosimetric properties of quartz extracted from these samples are good for reconstruction of doses in excess of several mGy. Doses were evaluated using single and multi-aliquot high temperature TL, pre-dose TL technique as well as optically stimulated luminescence (OSL) of samples of quartz. Measurements of Ukrainian samples were performed both in RCRM (TL reader Harshaw 3500, high temperature option) and in University of Helsinki (TL/OSL reader RISØ) as well as in a number of other laboratories in Germany, Great Britain, Spain and Denmark. The results of this international study are presented in [11]. It was found that cumulative doses determined by TL dosimetric technique are in good agreement with dose estimates derived from radioecological models, and there is no indication of unaccounted component of dose due to cloud shine or contribution of short-lived radionuclides. Aside scientific significance, this result had socio-psychological impact eliminating "legendary" data on excessive exposure of population in course of passage of radioactive release from Chernobyl.

RETROSPECTIVE DOSIMETRY OF CLEAN-UP WORKERS (LIQUIDATORS)

The most exposed category of Chernobyl population is clean-up workers, also known as "liquidators". In Ukraine about 300,000 individuals are officially certified as liquidators, who had performed various activities within the 30-km exclusion zone over 1986 – 1990. By its nature this cohort is extremely heterogeneous and, respectively, accumulated doses vary significantly [2]: from a fraction of mGy to several Gy, methods and results of dosimetric monitoring undertaken at the time of clean-up [3] vary as well. Moreover, about half of Ukrainian liquidators do not have registered dose values at all. From the other hand, due to its quantity and reasonably high doses, this cohort is a good platform for epidemiological studies of health effects of radiation and estimation of risk factors for moderately low dose protracted exposure. Notably, two major epidemiological studies were performed in cooperation with the U.S. National Cancer Institute [5] and Columbia University [4], for leukaemia and cataracts among liquidators, respectively. These two studies had different design, investigated various endpoints and, respectively, concerned different organs of interest.

In case of case-control leukemia study, red bone marrow doses should be estimated to all subjects of the study (cases and controls in 1:5 proportion, both diceased and alive). Since leukemia is quite rare disease, any identified case should be accompanied by dose reconstruction to be performed to all subjects in some uniform way. Existing methods of dose reconstruction were not applicable because of high sensitivity threshold (FISH dosimetry), limited availability of samples (EPR dosimetry with teeth) or both insufficient sensitivity and decay of markers of radiation (conventional cytogenetic dosimetry with unstable chromosome aberrations). In response to this demand a new analytical (time-and-motion) method called RADRUE [12] was developed by the international dosimetry group, consisting of researchers from Ukraine, Russia, Byelarus, Lithuania, USA and France. This method is based on the information about behavior and migration of a subject, which is collected in course of a personal interview (an alive subject) or interview with a proxy (a colleague of a diceased subject), dose rate maps related to respective areas and time intervals and expert evaluation and interpretation of the questionnaire data (Figure 1). RADRUE has built-in stochastic modelling capability, which allows generation of individual uncertainty distributions for all subjects of a study.

Figure 1. Basic flow-chart of RADRUE method

This method was applied individually for reconstruction of doses to 572 subjects of U.S. – Ukraine [5] and 357 subjects of EU – Russia – Byelarus – Baltic countries [13] studies. Details of application of RADRUE method to reconstruction of individual doses of Ukrainian liquidators are presented in [14]. It was found that individual doses of study subjects varied by 7 orders of magnitude – from fractions of mGy to more than 3 Gy, mean dose was 87 mGy, median – 16 mGy.

Ukrainian – American Chernobyl Ocular Study (UACOS) [4] utilized cohort approach, when risk of cataract induction was studied in 8,607-member cohort of liquidators of 1986 – 1987. It should be noted that due to presence of relatively long-lived beta-emitters in Chernobyl release, doses to lens were to be estimated from both gamma and beta radiation. Beta doses to lenses were estimated based on respective gamma dose values, conversion coefficients were estimated with respect to conditions of exposure (use of protective goggles, work in- or outdoors etc.) and time after the accident (which influenced time-dependent nuclide composition of contamination and, respectively, ratio of beta to gamma dose rates). Frequency distribution of individual beta/gamma dose ratios is presented at Figure 2. Both gamma and beta doses to eye lens were calculated using Monte Carlo method for the most typical irradiation scenarios [15].

Due to the large number of study subjects, individual interview and dose reconstruction was not plausible. Therefore, Official Dose Records (ODR) were used as a starting point for dose estimation effort. A simple questionnaire was sent by mail to the subjects aiming at collection of information about type of work, affiliation (which had effect on dosimetric monitoring practices at time of clean-up) and parameters, influencing beta/gamma ratio. Then, using the information about historic dosimetric monitoring practices, ODRs were retrospectively recalibrated (adjusted) using EPR dosimetry with teeth [16] as a "gold standard". Results of this "recalibration" are quite instructive – it was demonstrated that ODR for military liquidators (95 % of subjects with registered doses) are on average 2.2 times overestimating actual exposure. This seemingly unexpected conclusion yet has rational explanation – doses at the time of clean-up were estimated using overly conservative method, however, degree of conservatism was never estimated before this study. For each study subject individual dose distribution of total (gamma + beta) dose was calculated and used in course of epidemiological analysis [4].

Figure 2. Relation between beta and gamma components of dose to lens for 8,607 UACOS subjects.

Development and application of instrumental dose reconstruction method using Electron Paramagnetic Resonance (EPR) of tooth enamel is worth separate reference. In early 1990s EPR dosimetry with teeth was a unique technique, each laboratory had practiced its own protocol. Highly focused research and development in this area, which was conducted in RCRM lab proved to be quite fruitful and yielded in highly efficient technique, which successfully performed in a number of international intercomparisons, starting from 1995 [17]. RCRM EPR dosimetry protocol allows reconstruction of doses in excess of 50 mGy with ±25 mGy uncertainty [16] – a useful dose range is well in agreement with doses received by Chernobyl liquidators. The abovementioned accuracy estimates were confirmed in course of blind intercomparisons (see, for example Table 1). The main limitation for application of EPR dosimetry with teeth is restricted availability of samples – whole teeth extracted in course of regular dental practice by medical prescriptions only. In order to address this issue, a nation-wide collection of teeth of Ukrainian liquidators was initiated in mid-1990s, to date 10321 teeth from 5875 liquidators were collected and stored in the Central Bank of Dosimetric Biosamples. This Bank provides plentiful supply of samples for various kinds of tests and comparisons (like mentioned above retrospective recalibration of ODRs).

Table 1. Performance of RCRM protocol for EPR dosimetry with tooth enamel – results of the 3rd International Intercomparison

Dose range	**Absolute error,** mGy	**Relative error**
	Demonstrated *vs.* (predicted)	
Low dose (five 79 mGy samples)	8 (25)	9.80 % (35 %)
Medium dose (five 176 mGy samples)	24.8 (25)	14 % (15 %)
High dose (one 704 mGy sample)	68 (70)	9.70 % (10 %)
In the whole dose range	27 (32)	12 % (26 %)

CONCLUSIONS

Over 25 years passed after Chernobyl accident a broad variety of retrospective dosimetry problems was addressed by the team of Research Center for Radiation Medicine AMS Ukraine. In most cases, particular needs called for development of new techniques and approaches. These approaches were quite different, yet all were aimed at reconstruction of individual doses to the subjects exposed after Chernobyl accident and paid special attention to assessment of associated uncertainties. The dose estimates were used for evaluation of impact of the accident on evacuated population and residents of contaminated areas downwind Chernobyl as well as for analytical epidemiological studies and estimation of risk factors. Although these tasks constituted a challenge, most of the aims were achieved and now dose reconstruction approaches and techniques were brought to new qualitative level. Though each dose reconstruction effort is unique and is determined by the needs of a particular study, the accumulated experience could be applied for broad variety of retrospective and emergency dosimetry applications.

REFERENCES

[1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. New York, United Nations, 2011.

[2] Bouville A, Chumak V, Inskip P et al. The Chernobyl accident: Estimation of radiation doses received by the Baltic and Ukrainian workers. Rad Res 2006; 166:158-167.
[3] Chumak V. Physical dosimetry of Chernobyl cleanup workers. Health Phys 2007;93:452-461.
[4] Worgul B, Kundiyev Y, Sergiyenko N et al. Cataracts among Chernobyl clean-up workers: Implications regarding permissible eye exposures. Rad Res 2007;167: 233-243.
[5] Romanenko A, BebeshkoV, Hatch M et al. The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: I. Study methods. Rad Res 2008;170:691-697.
[6] Likhtarev I, Chumak V, Repin V. Retrospective reconstruction of individual and collective external gamma doses of population, evacuated after the Chernobyl accident. Health Phys 1994;66:643-652.
[7] International Atomic Energy Agency. Summary report on the post-accident review meeting on the Chernobyl accident. Vienna: IAEA; Safety Series №75-INSAG-1. IAEA; 1986.
[8] Meckbach R, Chumak V. Reconstruction of the external dose of evacuees from the contaminated areas based on simulation modeling Proc. First Intern. Conf. "The radiological consequences of the Chernobyl accident", Minsk (Belarus), March 18-22, 1996; Luxembourg:ECSC-EC-EAEC;1996. 975-984.
[9] Likhtarev I, Kovgan L, Jacob P et al. Chernobyl accident: retrospective and prospective estimation of external dose of the population of Ukraine. Health Phys 2002;82:290-303.
[10] Aitken MJ. Thermoluminescence dating. London, Academic Press, 1985. ISBN 0-12-046380-6.
[11] Bailiff I, Stepanenko V, Göksu H et al. Comparison of retrospective luminescence dosimetry with computational modeling in two highly contaminated settlements downwind of the Chernobyl NPP. Health Phys 2004;86:25-41.
[12] Kryuchkov V, Chumak V, Maceika E et al. RADRUE method for reconstruction of external doses to Chernobyl liquidators in epidemiologic studies. Health Phys 2009;97:275-298.
[13] Kesminiene A, Evrad A, Ivanov V et al. Risk of Hematological Malignancies among Chernobyl Liquidators. Rad Res 2008;170:721-735.
[14] Chumak V, Romanenko A, Voilleque´ P et al. The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: II. Estimation of bone marrow doses. Rad Res 2008;170:698-710.
[15] Chumak V, Worgul B, Kundiyev Y et al. Dosimetry for a study of low-dose radiation cataracts among Chernobyl clean-up workers. Rad Res 2007;167:606–14.
[16] Chumak V, Sholom S, Bakhanova E et al. High precision EPR dosimetry as a reference tool for validation of other techniques. App Rad Isot 2005;62:141–146.
[17] Chumak V, Bailiff I, Baran N et al. The first international intercomparison of ESR-dosimetry with teeth: first results. Appl Radiat Isot 1996;47:1281-1286.

OKRUGLI STOL

ROUND TABLE

AKREDITACIJA I ZAŠTITA OD ZRAČENJA – TREBAMO LI JE ZBOG ZAKONA ILI ZBOG NAS

Gregor Omahen i Urban Zdešar
ZVD Zavod za varstvo pri delu d.d., Ljubljana, Slovenija
gregor.omahen@zvd.si, urban.zdesar@zvd.si

UVOD

Laboratoriji koji se bave zaštitom od zračenja te zbog toga i mjerenjem radioaktivnosti, brzina doze i kontaminacije, oduvijek su bili vezani za kvalitetu svojih mjerenja, naročito oni, koji su obavljali mjerenja za nuklearne elektrane. U laboratorijima je nerijetko bilo važnije da su ljudi stručni, da se bave i znanstvenim radom i znaju interpretirati rezultate mjerenja. Vrlo često to ne ide zajedno s rutinskim stvarima, kakve su provjeravanje mjernog instrumentarija i zapisi o kvaliteti. Naručitelj ipak traži rezultate mjerenja kojima se može vjerovati. To je svrha standarda SIST EN ISO/IEC 17025 [1] koji je na snazi od 1999. i u kojem su navedeni zahtjevi za ispitne i kalibracijske laboratorije. U nekim je zemljama zahtjev za akreditaciju ispitnih laboratorija prema SIST EN ISO/IEC 17025 čak u regulativi. Takav je zahtjev primjerice u regulativi Hrvatske i Slovenije za laboratorije koji se bave mjerenjem radioaktivnosti, brzine doze, kontaminacije ili provjeravanjem RTG aparata. Nekoliko laboratorija ima akreditaciju već nekoliko godina.

KAKO DO AKREDITACIJE ZA ISPITNI LABORATORIJ?

Da bismo mogli akreditirati neku metodu po standardu SIST EN ISO/IEC 17025, moramo ispuniti administrativne zahtjeve (koji se uglavnom odnose na vođenje laboratorija) i tehničke zahtjeve za mjerna ispitivanja. Tehničko ili znanstveno osoblje, koje se bavi mjerenjima, obično dosta dobro poznaje svoju opremu i metode kalibracije, mjernu nesigurnost metode, poznaje parametre okoline koji utječu na rezultate te, što je veoma bitno, zna i interpretirati rezultate mjerenja. Ponekad nam je ipak teško razumjeti zašto bi sve upute, prema kojima mjerimo, trebale biti u pisanom obliku ili zbog čega mjerna nesigurnost nije samo nešto što nam izbaci softver, nego je moramo znati izračunati i to čak staviti na papir.

VALIDACIJA METODE

Isto tako ponekad ne želimo shvatiti zahtjeve za uspoređivanje naših rezultata sa drugima. Pa odavno već obavljamo ta mjerenja, što znači, znamo svoj posao i koliko god puta mjerimo isti uzorak, dobit ćemo isti rezultat. Problem je, što sve dok ne validiramo svoje metode, ne možemo biti sigurni da je rezultat naših mjerenja pravi. Neki drugi laboratorij mogao bi dobiti sasvim drugi rezultat i to na istom uzorku za ispitivanje. Zbog toga svaku metodu treba validirati i nakon toga redovito pratiti postignutu kvalitetu. Jedan od boljih načina validacije, kao dijela kontrole kvalitete, je uspoređivanje s drugim laboratorijima, tj. interkomparacija. Ukoliko su pri interkomparaciji naši rezultati izvan prihvatljivog intervala, moramo pronaći razlog odstupanja i prema potrebi čak ispraviti svoju metodu.

Metoda se mora redovito provjeravati i, osim interkomparacija, mora postojati sistem kontrole rezultata. Redovitim testovima provjerava se oprema pa i naši postupci. Rezultate kontrole kvalitete najbolje je voditi u kontrolnim kartama u kojima odredimo granice prihvatljivosti rezultata. Ako su rezultati izvan tolerancija, trebamo prestati s ispitivanjima jer zbog nekog razloga ne možemo vjerovati rezultatima. Potrebno je pronaći taj razlog i ukloniti ga, a tek se nakon toga može se nastaviti s ispitivanjima.

RADNE UPUTE

Za tehnički dio nam, prema standardu, trebaju napisane radne upute ili postupci. Nije dovoljno da mi znamo kako se neko mjerenje obavlja i da to objasnimo svojim suradnicima, nego moramo biti sigurni da svi mi to na isti način i radimo. Napisati upute za rad nije nimalo lako, pogotovo jer nam to oduzima vrijeme za stručni rad, odnosno mjerenja, a osim toga od pisanja uputa ne možemo imati znanstvene radove niti zaraditi na tržištu. Zbog toga se za pisanje radnih uputa obično biraju mlađi suradnici, nerijetko s premalo iskustva i znanja. Rezultat toga je da treba puno revizija prije nego dobijemo zadovoljavajući dokument. Zbog toga bi radne upute trebao pisati onaj koji najviše radi na određenom poslu i najviše zna o metodi. Obično je to voditelj laboratorija. U jednoj od procedura mora biti opisano i određivanje mjerne nesigurnosti. Potrebno je identificirati sve parametre koji utječu na mjernu nesigurnost i ocijeniti njihov doprinos. Kasnije se neki od tih parametara zbog malog doprinosa mogu ignorirati i mjerna nesigurnost računa se samo za najvažnije. Obično su to nesigurnost kalibracije, brojanja i možda nekih parametara okoliša, a osobito kod analiza na granici osjetljivosti metode i nesigurnost zbog pozadine (backgrounda).

MJERNA OPREMA

Mjerna oprema nam obično definira opseg akreditacije – koliko niske ili visoke vrijednosti još možemo mjeriti i s kakvom mjernom nesigurnošću. Sva oprema mora biti kalibrirana, a uz nju moraju postojati dokumenti za upotrebu i održavanje. To mogu biti upute proizvođača ili upute samog laboratorija ako je oprema ili stara ili zbog nekih drugih razloga nemamo upute proizvođača. Oprema mora biti označena i za svaki dio mora postojati evidencija servisa, promjena, kalibracija, provjeravanja, kvarova. U slučaju, da oprema zbog nekih razloga nije u funkciji, potrebno ju je izolirati i označiti, te tako spriječiti njezinu upotrebu.

UZORCI

Ukoliko laboratorij sam uzorkuje materijale, koje kasnije ispituje, mora imati plan uzorkovanja. Za sve tipove uzoraka koje laboratorij ispituje moraju postojati upute za transport, prihvaćanje, rukovanje i dr. Laboratorij mora imati sistem za identifikaciju uzorka kako ne bi došlo do zamjena uzoraka i rezultata.

RUKOVOĐENJE

Standard SIST EN ISO/IEC 17025 bar jednaku pozornost kao tehničkom dijelu posvećuje i sustavu rukovođenja. U stvari, stavlja ga čak i ispred (u poglavlje 4) tehničkog dijela (u poglavlju 5). U ovom ga članku mi namjerno stavljamo iza tehničkog dijela jer je to obično dio na koji tehničko osoblje ima manji utjecaj, a možda ga čak i nema. Taj dio odnosi se na rukovodstvo laboratorija (tvrtke ili instituta), a oni koji obično imaju baš najmanje vremena za sustav kvalitete su direktori i šefovi. Zato se stvar rješava s takozvanim povjerenicima kvalitete, koji su od rukovodstva ovlašteni za sve što bar malo miriše na kvalitetu. Ponekad direktori, naročito oni, koji nisu svjesni važnosti kvalitete, na mjesto povjerenika kvalitete stavljaju kadar koji se nije iskazao na nekim drugim pozicijama. U tom slučaju ustanova će imati dug put do akreditacije. Jer baš na razini rukovodstva treba postaviti neki sistem koji će važiti za čitavu tvrtku, sve od priručnika sustava kvalitete do sistema dokumentacije, nabavke opreme, suradnje s kupcima, žalbe kupaca i dr.

AKREDITACIJA I ZRAČENJE

U Sloveniji su već 2003. bile podijeljene prve akreditacije na području mjerenja radioaktivnosti i ionizirajućeg zračenja. ZVD, Zavod za varstvo pri delu, te je godine dobio akreditaciju za gama spektrometriju i osobnu dozimetriju [2]. U narednim godinama ZVD je proširio akreditirane metode i danas ima na području ionizirajućeg zračenja akreditirane i mjerenje brzine doze, kontaminacije, mjerenja koncentracija radona i njegovih potomaka, doze u okolini, doze na ekstremitete, mjerenje stroncija $^{89}Sr/^{90}Sr$ i mjerenja dozimetrijskih veličina RTG uređaja. ZVD ima akreditirane praktički sve metode, koje je razvio na području mjerenja ionizirajućeg zračenja. U to je bio uložen veliki napor osoblja ZVD, a uložena su i velika financijska sredstva. Samo za godišnji posjet Slovenske akreditacije plaća se 15 000 EUR, a od toga pola otpada na metode ionizirajućeg zračenja. Ako uzmemo u obzir i više međunarodnih interkomparacija godišnje, redovite kalibracije, nabavku standarda i druge usporedbe, samo taj dio godišnje stoji oko 20 000 EUR. Stručno osoblje potroši i mnogo vremena na održavanje sistema kvalitete od unutrašnjih revizija, do procjene Slovenske akreditacije, rada na uputama, provjeravanju kvalitete i treningu radnika. Procjena je da taj trošak iznosi barem 30 000 – 50 000 EUR godišnje. Ukupan trošak ZVD za održavanje akreditacije samo na području ionizirajućeg zračenja procjenjujemo na 50 000 – 70 000 EUR godišnje.

Trošak je velik, no je li i potreban? Prvi je razlog, da je akreditacija po slovenskom zakonu jedan od uvjeta za ovlaštenje na području ionizirajućih zračenja. Zato smo svi, koji se u Sloveniji bavimo tim mjerenjima, morali doći do akreditacije. Iako akreditacija donosi dosta troškova, za sada nam nije uspjelo troškove prevesti u više cijene na tržištu. Razlog je naravno konkurencija. Baš je akreditacija bila jedan od razloga čime se mislilo, da će se eliminirati konkurencija, a kad su svi na tržištu akreditirali metode makar uz velike troškove, drugi način konkurencijske borbe bilo je smanjivanje cijena. To je, naravno, bilo dobro za kupca koji je dobio kvalitetne rezultate za nižu cijenu. A konkurenti još do danas nisu uspjeli povećati cijene pa makar samo za troškove akreditacije.

Poslije više od 10 godina rada na akreditaciji i osam revizija Slovenske akreditacije, brojnim akreditiranim metodama stekli smo mnogo iskustva. Ima li od toga i neke koristi? Da. Prva i najveća korist je, da mi sami možemo vjerovati svojim rezultatima. Nekad nije bilo rijetko da se naručitelj (ili upravni organ) žalio na rezultate laboratorija i vrlo teško se otkrio razlog. Danas je žalbi puno manje, odnosno čak ih i nema, a kad bi ih bilo, pitanja vezana za rezultate mjerenja vrlo brzo možemo objasniti. Isto

tako, vrlo dobro znamo gdje su granice naših metoda i što njima možemo izmjeriti. Redovitim kontrolama opreme mnogo ranije uočavamo njene nedostatke pa imamo dovoljno vremena za servis i pripremu mjerenja na drugoj ispravnoj opremi. Mnogo je lakše i organizirati obuku (trening) osoblja. Jedan od zahtjeva akreditacije je i stručna obuka osoblja pa je zbog tog zahtjeva kod vodstva lakše opravdati odlazak na neke seminare i konferencije. Mjerna nesigurnost danas je nešto bez čega rezultat ni ne postoji. Rezultat bez mjerne nesigurnosti ništa ne znači i brojka je bez smisla. Prije akreditacije nije bilo rijetko, da je specifična aktivnost ^{137}Cs u zemlji bila 42 Bq/kg ili brzina doze 138 nSv/h.

Je li zbog akreditacije bolja zaštita od zračenja odnosno jesu li doze manje? Ne, ali je zbog akreditacije bolja procjena doza, kako radnika za koje vodimo osobnu dozimetriju, tako i stanovništvo, za koje iz rezultata mjerenja radioaktivnosti računamo doze.

Pošto je akreditacija uvjet za ovlaštenje na području mjerenja ionizirajućeg zračenja, upravni organi, u Sloveniji Uprava za nuklearnu sigurnost i Uprava za zaštitu od zračenja, odgovornost za stručni nadzor nad ovlaštenim organizacijama predali su Slovenskoj akreditaciji i stručnim ocjeniteljima. Na taj se način i kvaliteta mjerenja poboljšala jer upravni organi obično nisu imali stručnjake bolje od onih zaposlenih u ovlaštenim organizacijama pa se moglo i manipulirati stručnošću.

ZAKLJUČCI

Moglo bi se zaključiti, da je s akreditacijom prema Standardu SIST EN ISO/IEC 17025 kupac, koji želi rezultate na području zaštite od ionizirajućeg zračenja i mjerenja radioaktivnosti, dobio pouzdane rezultate za relativno nisku cijenu. S druge strane, akreditirani je laboratorij uveo red u svoj rad, postoje pravila za opremu, osoblje, obuku i sa svim time povećala se stručnost mjerenja. S akreditacijom je znatno lakše i nadoknaditi gubitak nakon odlaska djelatnika u mirovinu ili napuštanja laboratorija jer u laboratoriju uvijek moraju biti bar dva djelatnika koji znaju raditi na metodi. S akreditacijom se nije poboljšala zaštita od zračenja ili smanjili becquereli u zraku. Ali barem dobro znamo koliko su točni mSv ili Bq i koliko male mSv i Bq možemo izmjeriti.

LITERATURA

[1] SIST EN ISO/IEC 17025:2005: General requrements for the competence of testing and calibration laboratories. CENELEC, 2005.

[2] http://www.sa.gov.si/teksti-1/slo/katalog.htm

ACCREDITATION AND RADIATION PROTECTION – DO WE NEED IT BECAUSE OF THE LAW OR BECAUSE OF US

Gregor Omahen and Urban Zdešar
ZVD Zavod za varstvo pri delu d.d., Ljubljana, Slovenia
gregor.omahen@zvd.si , urban.zdesar@zvd.si

Laboratories involved in the protection against radiation and therefore in the measurement of radioactivity, dose rate and contamination have always been tied to the quality of their measurements, particularly those that have performed measurements for nuclear power plants. However in the laboratories more than quality it was more important, that people are professional, that they are engaged in scientific work and know how to interpret the results. Very often these are things that do not go along with reviewing the measuring instruments and quality records. However customer requires measurement results that can be trusted. This is the purpose of the standard SIST EN ISO / IEC 17025 in which the requirements for testing and calibration laboratories are standardised. The standard is in force since 1999. In some countries, a request for accreditation of testing laboratories according to SIST EN ISO / IEC 17025 is even in regulation. This request is for example in the Croatian and Slovenian regulations for laboratories involved in measuring the radioactivity, dose rate, contamination, or by checking the X-ray apparatus. Several laboratories have been accredited for several years. From that experience we can conclude that customer gets reliable results from the accredited laboratories at relatively low cost. On the other side laboratory which is accredited has introduced a line of work in the laboratory, there are rules for equipment, personnel, training and all that eventually enhance measurement expertise. With accreditation, it is much easier to compensate for the loss of workers due to pension or leaving the laboratory because every moment must always be in the laboratory at least two who know how to work on the method. Accreditation is not improving radiation protection or reducing becquerel in the air. But at least we know how accurate mSv or Bq are and how small mSv and Bq can be measured.

ISKUSTVA AKREDITACIJE LABORATORIJA IZ PODRUČJA ZNANOSTI O ZRAČENJU U REPUBLICI HRVATSKOJ

Zdenko Franić[1], Slobodan Galjanić[2] i Dragica Križanec[2]
[1]Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada,
Jedinica za zaštitu od zračenja, Zagreb
[2]Hrvatska akreditacijska agencija, Zagreb
zdenko.franic@imi.hr , slobodan.galjanic@akreditacija.hr

UVOD

Suvremeni globalizacijski procesi svjetskog gospodarstva gotovo se isključivo zasnivaju na infrastrukturi kvalitete. Dobra infrastruktura kvalitete uvjet je napretka gospodarstva te otvaranja novih radnih mjesta, a onda i ostvarivanja većeg društvenog blagostanja. Pokazalo se da društvene zajednice, odnosno države, s učinkovitim javnim strukturama, posebice onim koje se odnose na infrastrukturu kvalitete, u međunarodnim odnosima bolje artikuliraju i promiču svoje interese. Posljedično, uspostavljanje uvjeta za što bolju interakciju tehničkog zakonodavstva (tehnički propisi), mjeriteljstva, standardizacije i akreditacije unutar sustava infrastrukture kvalitete jest osnovni zadatak svake učinkovite zakonodavne i izvršne vlasti s ciljem osiguravanja sigurnosti proizvoda i usluga, zaštite okoliša te, što je najvažnije, zaštite zdravlja ljudi. Ne iznenađuje stoga što se jedan od najvažnijih segmenata Sporazuma o stabilizaciji i pridruživanju (SSP), kao instrumenta pristupanja Republike Hrvatske u punopravno članstvo Europske unije (NN 14/2001, 14/2002 i 1/2005), odnosi na usklađivanje tehničkog zakonodavstva. Prema članku 73. SSP-a, Hrvatska se obvezala da će promicati uporabu tehničkih propisa Europske zajednice i europskih normi te postupaka ispitivanja i ocjene sukladnosti, kao i poticati razvoj infrastrukture kvalitete.

Središnji segment infrastrukture kvalitete jest akreditacijsko tijelo čija je funkcija da kao nezavisna treća strana potvrđuje znanja, vještine i kompetencije tijela kojima se ispituje sukladnost (npr. ispitni i umjerni laboratoriji, certifikacijske organizacije, inspekcijska tijela itd.). Infrastruktura kvalitete zajedno sa segmentom koji se odnosi na intelektualno vlasništvo kao i na segment tehnologije (uključujući

istraživanje i razvoj), predstavlja tzv. inovacijski sustav (Slika 1) i preduvjet je za funkcioniranje gospodarstva zasnovanog na znanju.

Slika 1. Hrvatski inovacijski sustav

U ovom radu prikazana su iskustva akreditacije laboratorija čija se djelatnost odnosi na znanost o zračenju, a koji su akreditirani od strane hrvatskog akreditacijskog tijela, odnosno Hrvatske akreditacijske agencije (HAA).

Valja napomenuti da je HAA potpisala multilateralni sporazum (MA) s Europskom suradnjom za akreditaciju (*European Co-operation for Accreditation* – EA), a slijedom toga sporazum i s Međunarodnom konferencijom za akreditaciju (*International Laboratory Accreditation Conference* – ILAC) te je, posljedično, svako ispitivanje koje provede bilo koji laboratorij akreditiran od strane HAA priznato svugdje u svijetu.

AKREDITACIJA LABORATORIJA

U infrastrukturi kvalitete ključnu ulogu ima akreditacija, kao formalno priznavanje određenih kompetencija, npr. osposobljenosti laboratorija da obavlja neka ispitivanja. Akreditaciju dodjeljuje nezavisno akreditacijsko tijelo, koje i samo mora svoju osposobljenost dokazati vlastitom akreditacijom. U Republici Hrvatskoj takvo akreditacijsko tijelo jest Hrvatska akreditacijska agencija.

Glavne karakteristike akreditacije jesu:

- priznavanje tehničke kompetencije,
- specifično područje akreditacije,
- ocjenjuje se osoblje, vještine i znanje, oprema i provedba postupaka ispitivanja,
- ocjenu vode tehnički visokokompetentni ocjenitelji,
- ocjenjuje se i sustav upravljanja kvalitetom,
- akreditacija može uključivati i provedbu specifičnih testova, npr. interkomparacije, međulaboratorijska ispitivanja, mjeriteljske audite i sl.

Valja napomenuti da je sustav akreditacije u pravilu dobrovoljno područje i svaki subjekt sam procjenjuje hoće li mu to donijeti neku tržišnu prednost.

Sve je raširenija praksa da zahtjev za akreditacijom uđe u neki zakonski akt (dakle u zakonima uređeno područje) kao dokaz stručne i tehničke osposobljenosti ispitnih ili umjernih laboratorija. Posljedično, akreditacijska tijela surađuju s tijelima državne uprave ocjenjujući osposobljenost različitih laboratorija, certifikacijskih i inspekcijskih tijela za potrebe provedbe različitih propisa. To se ocjenjivanje odnosi na propise kojima su preuzete smjernice (direktive) tzv. novoga pristupa za sigurnost industrijskih proizvoda kao i na propise iz područja sigurnosti hrane, zaštite od buke, ispitivanje radioaktivnosti, praćenja kakvoće zraka i sl.

Na području zaštite od zračenja ciljevi kvalitete proizlaze iz dva ključna dokumenta:

- Nacionalne strategije zaštite okoliša koju je usvojio Hrvatski sabor 25. siječnja 2002. godine (NN 46/2002) i
- Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti iz 2010. godine (NN 28/2010).

Prema dostupnim podacima u Republici Hrvatskoj su po normi HRN EN ISO/IEC 17025 (Norma) akreditirana tri tijela (u smislu norme laboratoriji) čija se djelatnost odnosi na znanost o zračenju. To su kako slijedi:

1. Laboratorij za radioekologiju Instituta Ruđer Bošković (Područje: *Mjerenje sadržaja radionuklida u uzorcima iz okoliša i proizvodima – uključujući hranu i vodu za piće*)

2. EKOTEH Dozimetrija d.o.o., Odjel za zaštitu od zračenja (Područje: *Ispitivanja u području zaštite od ionizirajućih i neionizirajućih zračenja*)
3. Jedinica za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (Područje: *Određivanje radioaktivnosti*).

Tijekom procesa akreditacije u ocjenjivanju spomenutih laboratorija je od strane HAA do sada sudjelovalo 2 vodeća i 6 stručnih ocjenitelja. Ukupno su provedena i tri nadzorna pregleda. Zbirna struktura pronađenih nesukladnosti je prikazana na Slici 2.

Slika 2. Broj nesukladnosti prema zahtjevima Norme

Ukupno je pronađeno 118 nesukladnosti od čega se 48 (40,7 %) odnosilo na poglavlje 4 Norme, a 70 (50,3 %) na poglavlje 5. Najveći broj nesukladnosti, 21 (17,8 %) se odnosi na zahtjev 5.4 (Ispitne i umjerne metode i validacija metoda). Po broju nesukladnosti slijede potom nesukladnosti vezane na zahtjeve 4.3 (Upravljanje dokumentima), gdje je pronađeno 12 nesukladnosti (10,2 %) i 5.9 (Osiguravanje kvalitete rezultata) s 11 nesukladnosti (9,3 %). Međutim, vezano uz zahtjeve 4.5

(Podugovaranje ispitivanja i umjeravanja), 4.8 (Pritužbe) i 4.11 (Popravne radnje) nije pronađena niti jedna nesukladnost.

Važno je napomenuti da je, iako se za sva tri laboratorija radi o ranim fazama životnoga vijeka akreditacije, u nadzornim pregledima zamjetljiv trend smanjivanja ne samo ukupnoga broja pronađenih nesukladnosti, već i nesukladnosti prema pojedinim zahtjevima Norme.

Također, iz neposrednih kontakata sa zaposlenicima laboratorija, vidljiv je porast svijesti o kvaliteti i izostanak otpora "prema dodatnim obvezama i papirologiji" koji je u pravilu bio prisutan kod prve akreditacije. Štoviše, i voditelji laboratorija i zaposlenici ističu da im je akreditacija olakšala svakodnevni posao, učvrstila samopouzdanje te olakšala poslovanje s kupcima, odnosno donijela znatne marketinške i tržišne prednosti.

OSIGURAVANJE KVALITETE PRAĆENJA KAKVOĆE ZRAKA

Važan zahtjev norme HRN EN ISO/IEC 17025 jest osiguravanje kvalitete ispitivanja odnosno ispitnih rezultata. Osiguranje kvalitete ispitivanja postiže se i dokazuje sudjelovanjem u tzv. MQA (*Measurement Quality Assurance*) interkomparacijskim programima i mjerenjima (*Intercomparisons*), kružnim ispitivanjima (*Round Robin Tests*) i ispitivanjima osposobljenosti (*Proficiency Testing*). Takvi programi procjenjuju pogodnost određene procedure, prostorije i opremu, kao i periodičke akcije provjere cjelokupne osposobljenosti. Naročita se pažnja posvećuje sudjelovanju laboratorija u interkomparacijskim programima i testovima. Gore navedeni laboratoriji su shvatili izuzetnu važnost sudjelovanja u međulaboratorijskim usporedbama i testovima osposobljenosti, pa su čak samoinicijativno i sami izmjenjivali određene uzorke u cilju usporedbi. Ta je aktivnost uvelike olakšana i činjenicom da Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) te *Joint Research Center* Europske komisije, kao davatelji usluga međulaboratorijskih usporedbi svoje aktivnosti ne naplaćuju. Naime, Europska unija kao i cijela međunarodna zajednica izuzetnu pažnju posvećuju radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti, a posljedično i osposobljenosti laboratorija koji djeluju u tom području. Također, pri tome je važno da su laboratoriji izuzetnu pažnju posvetili izražavanju mjerne nesigurnosti provedenih mjerenja odnosno ispitivanja.

ZAKLJUČAK

Ovaj kratki prikaz zbog ograničenoga prostora prikazuje samo neka iskustva iz akreditacije tri laboratorija koja djeluju na području znanosti o zračenju, odnosno u segmentu zaštite od zračenja, a akreditirani su od strane Hrvatske akreditacijske agencije.

Iako je akreditaciju, u području zaštite od zračenja, kao uvjet za suradnju i dobivanje poslova monitoringa, kao nadležno tijelo državne uprave propisao Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, laboratoriji su akreditaciji pristupili izuzetno odgovorno i inovativno.

Posljedično, s aspekta HAA i njezinih ocjenitelja koji su sudjelovali, ili još uvijek sudjeluju u ocjenjivanju i nadzoru spomenutih laboratorija, iz godine u godinu je vidljiv izuzetan napredak u primjeni sustava upravljanja, što ima vidljivih posljedica na stabilizaciju i napredak njihovog poslovanja.

LITERATURA

[1] Hrvatska akreditacijska agencija. Registar akreditiranih tijela. Dostupno na: http://www.akreditacija.hr/registar

[2] Hrvatska akreditacijska agencija. Završni izvještaji vodećih ocjenitelja za Laboratorije iz područja znanosti o zračenju. 2008-2011.

[3] Hrvatski zavod za norme. HRN EN ISO/IEC 17025:2007 Opći zahtjevi za osposobljenost umjernih i ispitnih laboratorija. Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2007.

[4] European Co-operation for Accreditation – EA. Dostupno na: http://www.european-accreditation.org/content/home/home.htm

[5] International Laboratory Accreditation Cooperation – ILAC. ILAC Mutual Recognition Arrangement. ILAC, 2001. Dostupno na: http://www.ilac.org/ilacarrangement.html

EXPERIENCES IN ACCREDITATION OF LABORATORIES IN THE FIELD OF RADIATION SCIENCE

Zdenko Franić[1], Slobodan Galjanić[2] and Dragica Križanec[2]
[1]Institute for Medical Research and Occupational Health,
Radiation Protection Unit, Zagreb, Croatia
[2]Croatian Accreditation Agency, Zagreb, Croatia
zdenko.franic@imi.hr , slobodan.galjanic@akreditacija.hr

Efficient interaction of technical legislation, metrology, standardization and accreditation within the system of quality infrastructure is precondition for assurance of safety of goods and services as well as protection of humans and environment. In the paper importance of quality infrastructure on national and international levels is presented while special interest is paid to accreditation. Current situation regarding the accreditation of laboratories in the field of radiation science is presented.

Regarding this field, in Croatia three laboratories are accredited by Croatian Accreditation Agency:

1. Laboratory for Radioecology, Ruđer Bošković Institute (Scope: *Measurement of radionuclide content in environmental samples and commodities – Including foodstuffs and drinking water*)
2. EKOTEH Dozimetrija d.o.o., Department for Radiation Protection (Scope: *Testing in the scope of ionizing and nonionizing radiation*)
3. Radiation Protection Unit, Institute for Medical Research and Occupational Health (Scope: *Determination of radioactivity*).

OPĆE TEME

GENERAL TOPICS

ANALIZA UČINKOVITOSTI I USKLAĐENOSTI S EU PROPISIMA ZAKONODAVSTVA KOJIM SE REGULIRA RADIOLOŠKA I NUKLEARNA SIGURNOST

Dragan Kubelka[1], Nikša Sviličić[1], Ivana Kralik[1], Nera Belamarić[1], Dario Faj[2], Nevenka Novosel[1], Vanja Vukić[1] i Zdravka Tečić[1]
[1]Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, Zagreb
[2]Klinički bolnički centar Osijek, Osijek
dragan.kubelka@dzrns.hr

UVOD

Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), temeljem svog statuta ima zadaću da u zajedništvu s Ujedinjenim narodima i drugim organizacijama koje teže istim ciljevima uspostavi sigurnosne standarde za zaštitu zdravlja ljudi i svede na minimum opasnosti po njihov život. Vijeće Guvernera IAEA 1960. godine odobrilo je mjere sigurnosti i zaštite [1] koje su bile temeljene, koliko je god bilo moguće na preporukama Međunarodne komisije za radiološku zaštitu (ICRP). Vijeće guvernera po prvi puta je odobrilo "Osnovne sigurnosne standarde" 1962. godine [2]. Treća revidirana verzija je publicirana u suradnji sa Svjetskom organizacijom rada (ILO) i Svjetskom zdravstvenom organizacijom (WHO) [3]. Vrlo važan korak prema međunarodnoj harmonizaciji zaštite od ionizirajućeg zračenja napravljen je 1990. godine kada je uspostavljen Među-agencijski odbor za radiološku sigurnost (IACRS) u cilju suradnje između međunarodnih organizacija. U okviru te suradnje, institucije su uspostavile zajedničko tajništvo za pripremu Međunarodnih osnovnih sigurnosnih standarda za zaštitu od ionizirajućeg zračenja i za sigurnost izvora ionizirajućeg zračenja [4]. Standard se oslanja na Preporuke Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja iz 1990. godine [5]. ICRP je nevladina znanstvena organizacija osnovana 1928. godine u cilju uspostave osnovnih principa i preporuka za zaštitu od ionizirajućeg zračenja. Komisija tijesno surađuje sa sestrinskim tijelom Međunarodnom komisijom za radijacijske jedinice (ICRU) i ima službene odnose s WHO i IAEA. Vrlo je važna i suradnja s ILO i tijelima UN-a, a posebno treba naglasiti Znanstveni odbor Ujedinjenih naroda za učinke atomskog zračenja (UNSCEAR) i program UN-a za okoliš, EU, te Međunarodnom udrugom za zaštitu od zračenja (IRPA).

Sistem zaštite koji predlaže Komisija je rađen s namjerom da bude općenit koliko je moguće, dijelom zbog dosljednosti, a dijelom da se izbjegnu promjene koje bi rezultirale iz razgraničenja različitih situacija. Predloženi sustav radiološke zaštite bazira se na tri načela: načelo ograničenja, opravdanosti i optimizacije. Granice doza treba utvrditi za razne skupine ljudi, kao što su radnici, vježbenici, studenti i pučanstvo.

U provedbi ovih načela, jedan od bitnih čimbenika je uspostava nadzora kvalitete, kao i program ispitivanja i inspekcije koji trebaju provoditi nadležna tijela kako bi se zaštita od zračenja osigurala na odgovarajući način.

Nove znanstvene spoznaje do kojih se došlo u međuvremenu uvjetovale su promjene u pristupu i suštini zaštite od ionizirajućeg zračenja. Pregled ovih spoznaja, kao i novi pristup zaštiti u obliku preporuka objavila je ICRP u svojoj publikaciji broj 60 [5]. Na osnovi ovih preporuka pokazalo se pogodnim napraviti promjene temeljnih standarda zaštite u EU, kao i donošenje istih u novom propisu. S tim u vezi, donesena je Direktiva 96/29/Euratom kojom se utvrđuju osnovni sigurnosni standardi za zaštitu zdravlja radnika i pučanstva u cjelini u odnosu na opasnosti od ionizirajućeg zračenja [6]. Nadopuna ove smjernice data je Direktivom 97/43/Euratom [7], u smislu uređenja općih načela zaštite od zračenja pojedinaca od ionizirajućeg zračenja pri medicinskom izlaganju s ciljem propisivanja mjera za zaštitu osoba koje se dragovoljno i dobrovoljno izlažu ionizirajućem zračenju i pomažući bolesniku.

Navedene odredbe sadržane u direktivama osiguravaju osnovnu zaštitu od izvora ionizirajućeg zračenja. No, kako radioaktivni izvori visokih aktivnosti unatoč tome imaju značajan potencijalni rizik po zdravlje ljudi i za okoliš, a u cilju osiguranja još strože kontrole nad njima, i to od trenutka proizvodnje pa do predavanja u ovlašteno postrojenje za dugoročno skladištenje ili odlaganje, donesena je Direktiva 03/122/Euratom [8].

U postupku usklađivanja domaćeg zakonodavstva s pravnom stečevinom Europske unije, vezano uz poglavlje 15. Energetika, za područje nuklearne sigurnosti i zaštite od ionizirajućeg zračenja dana su mjerila koja trebaju biti ispunjena. Ona se odnose na jačanje i optimiziranje administrativnih kapaciteta iz područja nuklearne sigurnosti i zaštite od ionizirajućeg zračenja te na usvajanje nacionalne strategije postupanja s radioaktivnim otpadom i istrošenim nuklearnim gorivom.

Zakonom o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti [9], područje zaštite od ionizirajućeg zračenja i nuklearne sigurnosti potpuno je usklađeno s pravnom stečevinom Europske unije. Sukladno usvojenom Zakonu [9],

osniva se jedinstveno regulatorno tijelo, Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost i osigurava se njegova neovisnost, administrativna i stručna kapacitiranost te se postavljaju osnove za sustavnu provedbu, praćenje i reviziju Strategije zbrinjavanja radioaktivnog otpada i istrošenog nuklearnog goriva.

Zakonom o izmjenama i dopunama Kaznenog zakona [10], izrada, posjedovanje, prijevoz, opskrba ili uporaba oružja, eksploziva, nuklearnog ili radioaktivnog materijala je kazneno djelo ako se ne obavlja u skladu sa zakonskim odredbama.

Osnovu za provođenje mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja čine propisi, a njihova usklađenost s europskim i međunarodnim normama osigurava da provođenjem tih normi zaštita pojedinca, kao i okoliša, bude učinkovita. Kao što je ranije navedeno, postoje razni parametri kroz koje se može pratiti učinkovitost zaštite od ionizirajućeg zračenja, a sigurno je jedan od neposrednijih pokazatelja izloženost pojedinca.

MATERIJAL I METODE

U ovome radu pratila se izloženost ionizirajućem zračenju izloženih radnika kroz period od deset godina. Stupanj izloženosti vanjskom ozračenju izloženih radnika praćen je na osnovu rezultata mjerenja koja su rađena film dozimetrima, odnosno termoluminiscentnim dozimetrima, a provode ih ovlašteni stručni tehnički servisi. Za svakog izloženog radnika bilježe se mjesečne efektivne doze koje se procjenjuju temeljem osobnog doznog ekvivalenta $H_p(10)$.

Dozimetrijski sustav za mjerenje osobnih doza u području izloženosti mora osigurati razinu povjerenja od 95 % s faktorom nesigurnosti koji nije veći od 1,5, a ako su efektivne doze niže od 4 mSv, faktor nesigurnosti mora biti manji od 2. Najmanja doza koju sustav mora pouzdano izmjeriti iznosi 0,17 mSv za $H_p(10)$. Nesigurnost uključuje pogreške mjerenja zbog promjenjive osjetljivosti dozimetra o energiji zračenja i smjeru upada te pogreške u umjeravanju dozimetra.

REZULTATI

Izloženi radnici su razvrstani u razrede obzirom na primljenu dozu, bez obzira na vrstu izvora ionizirajućeg zračenja čijem zračenju su bili izloženi. (Tablica 1).

Tablica 1: Kolektivne doze u mSv, razvrstane po razredima za pojedine godine

Godišnja doza (mSv)	2000.		2001.		2002.		2003.		2004.	
	Broj osoba	Kolektivna doza	Broj osoba	Kolektivna doza	Broj osoba	Kolektivna doza	Broj osoba	Kolektivna doza	Broj osoba	Kolektivna doza
	3352	14,325	3641	19,957	4001	22,915	4116	22,139	4133	22,477
0,1 - 0,99	1190	431,75	999	313,185	649	208,7	665	201,996	736	214,882
1,0 - 1,99	109	149,5	91	121,96	70	100,9	90	121,068	80	110,273
2,0 - 2,99	40	96,72	34	82,12	29	68,84	25	61,725	43	102,131
3,0 - 3,99	19	65	17	57,59	16	55,53	18	59,595	12	43,455
4,0 - 4,99	9	39,77	13	57,39	9	38,865	14	59,38	7	32,7
5,0 - 9,99	30	205,91	34	259,37	24	174,225	25	182,177	17	117,605
10,0 - 14,99	7	82,36	3	35,67	6	75,36	9	112,39	14	164,39
15,0 - 19,99	0	0	1	18,33	0	0	1	16,89	4	71,911
20,0 - 24,99	0	0	3	68,82	0	0	0	0	0	0
25,0 - 29,99	0	0	0	0	0	0	0	0	1	26,71
30,0 - 34,99	2	66,45	0	0	0	0	0	0	0	0
40,0 - 44,99	1	41,33	1	42,75	0	0	0	0	1	40,59
Ukupno	4759	1193,12	4837	1077,14	4804	745,34	4963	837,36	5048	947,12

Godišnja doza (mSv)	2005		2006		2007		2008		2009	
	Broj osoba	Kolektivna doza	Broj osoba	Kolektivna doza	Broj osoba	Kolektivna doza	Broj osoba	Kolektivna doza	Broj osoba	Kolektivna doza
	4177	28,981	4315	26,9	4091	59,011	4580	29,595	3984	31,445
0,1 - 0,99	723	228,795	707	223,909	1220	319,064	992	279,469	1713	433,555
1,0 - 1,99	95	129,15	98	131,665	86	121,057	68	91,92	64	86,72
2,0 - 2,99	21	51,128	39	94,755	35	88,918	27	66,52	37	93,595
3,0 - 3,99	18	62,23	18	62,345	20	70,031	21	71,91	25	85,765
4,0 - 4,99	13	57,955	9	39,755	10	46,287	16	72,71	11	49,4
5,0 - 9,99	21	143,11	30	229,481	17	122,32	28	207,075	18	121,495
10,0 - 14,99	13	155,115	5	55,55	2	23,69	9	102,065	2	22,36
15,0 - 19,99	2	33,535	1	17,21	1	18,55	1	17,2	1	16,91
20,0 - 24,99	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22,9
35,0 - 39,99	1	36,28	0	0	0	0	0	0	0	0
40,0 - 44,99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ukupno	5084	926,28	5222	881,57	5482	868,93	5742	938,46	5856	964,15

Na Slici 1 prikazane su kolektivne doze za period od deset godina. Kolektivna doza najviša je u skupini radnika koji rade u zdravstvu i doprinosi 85,93 % ukupnoj kolektivnoj dozi svih izloženih radnika u Republici Hrvatskoj, dok je najniža u veterini.

Slika 1. Kolektivna doza za radnike izložene ionizirajućim zračenjima

Najviša kolektivna doza za sve izložene radnike iznosila je 1193 mSv i zabilježena je u 2000. godini. U periodu 2001./2002. godine zabilježen je nagli pad, kada je kolektivna doza iznosila 1077 mSv, odnosno 745 mSv. Nakon 2002. godine, u razdoblju do 2010. godine, kolektivna doza se kretala između 837 mSv i 964 mSv, bilježeći blagi rast koji odgovara porastu broja izloženih radnika (Slika 1).

Najviša godišnja doza zabilježena je 2000. godine kada je jedan izloženi radnik primio dozu od 41,33 mSv. Također je zabilježena i godišnja doza od 40,59 mSv u 2004. godini.

U središnjem registru vode se podaci za dva izložena radnika kod kojih su u desetom mjernom razdoblju 2009. godine zabilježene doze od 81,08 mSv i 19,6 mSv. Obzirom da je prema izvješću ovlaštenog stručnog tehničkog servisa opravdano zaključiti da je došlo do ozračenja dozimetara, a da pri tome izloženi radnici nisu ozračeni, rezultati ovih mjerenja nisu uzeti u obzir.

ZAKLJUČAK

Uspostava modernog sustava zaštite od ionizirajućeg zračenja na načelima europskih direktiva kojima se regulira ovo područje te usvajanje osnovnih standarda sadržanih u Međunarodnim osnovnim sigurnosnim standardima za zaštitu od ionizirajućeg zračenja i za sigurnost izvora zračenja [4] započela je sredinom devedesetih godina. Prvi značajni koraci k tom cilju, napravljeni su 1999. godine stupanjem na snagu Zakona o zaštiti od ionizirajućih zračenja [11] te uspostavom i početkom rada Hrvatskog zavoda za zaštitu od zračenja, institucije koja je imala osnove regulatornog tijela. Time se osiguralo prikupljanje i vođenje relevantnih podataka vezanih uz izvore ionizirajućeg zračenja koji se koriste u zdravstvu, industriji, veterini i znanstvenoistraživačkim djelatnostima. Značajna novina bila je uspostava središnjeg registra izloženih radnika te prikupljanje dozimetrijskih podataka o njihovom ozračenju. Na taj način je osigurano da se lako mogu analizirati ukupne doze koje prima pojedinac bez obzira radi li kod više poslodavaca i koji ovlašteni stručni tehnički servis obavlja dozimetrijsku procjenu ozračenja. Iz tako dobivenih podataka može se zaključiti da ni u jednom slučaju nije došlo do prekoračenja zakonom propisane doze od 100 mSv u pet uzastopnih godina, odnosno da ni u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja nije dosegnuta doza od 50 mSv. Tek je pet izloženih radnika primilo dozu veću od 30 mSv, što su ujedno i najviše zabilježene doze u promatranom razdoblju. Doze su zabilježene kod djelatnika koji rade s uređajima za kontrolu zavara te inženjera medicinske radiologije i liječnika u intervencijskoj radiologiji. Najviša kolektivna doza zabilježena je 2000. godine, dok je u 2002. godini iznosila 745,34 mSv, što je znatno smanjenje kolektivne doze obzirom na prethodnu. Nakon 2002. godine, kolektivna doza pokazuje izvjestan porast da bi se kroz daljnjih 7 godina zadržala u granicama između 837 mSv i 964 mSv.

Navedeni podaci mogu ukazati na to da je do poboljšanja zaštite od ionizirajćeg zračenja, ako je promatramo kroz smanjenje kolektivne doze, došlo i zbog primjene standarda koji su se počeli usklađivati s europskim, odnosno međunarodnim, kao i zbog uspostave učinkovitijih administrativnih mjera.

Donošenjem novih propisa te nakon uspostave neovisnog i učinkovitog regulatornog tijela unutar kojeg će biti uspostavljena i inspekcija, može se pretpostaviti da će doći do daljnjeg smanjenja kolektivne doze. Smanjenju kolektivne doze doprinjet će i uvođenje sustava kontrole kvalitete u dijagnostičkim postupcima. Smanjenje doze pacijenta također će doprinjeti smanjenju doze izloženih radnika.

LITERATURA

[1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Agency's Health and Safety Measures. INFCIRC/18. Vienna: IAEA; 1960.

[2] International Atomic Energy Agency (IAEA). Basic Safety Standards for Radiation Protection. Safety Series No. 9. Vienna: IAEA; 1960.

[3] International Atomic Energy Agency (IAEA). Basic Safety Standards for Radiation Protection (1982 Edition). Safety Series No. 9. Vienna: IAEA; 1982.

[4] International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: IAEA; 1996.

[5] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60. Oxford: Pergamon Press; 1990.

[6] EURATOM. Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionizing radiation. Dostupno na: http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/doc/legislation/9629_en.pdf .

[7] EURATOM. Council Directive 97/43/Euratom of 30 June 1997 on health protection of individuals against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure. Dostupno na: http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radioprotection/doc/legislation/9743_en.pdf

[8] EURATOM. Council Directive 2003/122/Euratom of 22 December 2003 on the control of high-activity sealed radioactive sources and orphan sources. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:346:0057:0064:EN:PDF

[9] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Narodne novine 28/2010.

[10] Zakon o izmjenama i dopunama Kaznenog zakona. Narodne novine 152/2008.

[11] Zakon o zaštiti od ionizirajućih zračenja. Narodne novine 27/1999.

ANALYSIS OF EFFICACY AND CONFORMITY WITH THE EU *ACQUIS COMMUNAUTAIRE* OF THE RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY LEGISLATIVE

Dragan Kubelka[1], Nikša Sviličić[1], Ivana Kralik[1], Nera Belamarić[1], Dario Faj[2], Nevenka Novosel[1], Vanja Vukić[1] and Zdravka Tečić[1]
[1]State Office for Radiological and Nuclear Safety, Zagreb, Croatia
[2]Clinical Hospital Centre Osijek, Osijek, Croatia
dragan.kubelka@dzrns.hr

Regulatory framework for the radiation protection has been fully harmonised with the EU *acquis communautaire* by the Act on Radiological and Nuclear Safety passed in 2010. Pursuant to the Act, a unique regulatory body, the State Office for Radiological and Nuclear Safety is established and its independence, administrative and expert capacities ensured. Provisions of the Act regulate measures for the safety, protection against ionising radiation and physical security related to nuclear practices and practices involving sources of ionising radiation with the aim to provide appropriate protection of the individuals, society and environment for present and future generations. Legal provisions constitute the basis for implementation of the radiation protection measures. Their compliance with EU and international norms guarantees implementation of those norms, providing effective protection of individuals and the environment. Effectiveness of the radiation protection can be assessed through various indicators, of which one of the most direct is exposure of individuals. In this paper, exposure to ionising radiation of exposed workers through the period of ten years is analysed. The level of exposure to external radiation is based on recorded results of measurements performed by film or thermoluminescent dosimeters. For each exposed worker, monthly effective doses, estimated using $H_p(10)$ personal dose equivalent and regularly recorded, were used. The results indicate that the improvement of protection, when observed through decrease of the collective dose, is coincident with and can reasonably be attributed to the development of the radiation protection legislative, its harmonisation with EU and international standards and establishing of more effective administrative measures.

MEĐUNARODNA SURADNJA REPUBLIKE HRVATSKE NA PODRUČJU RADIOLOŠKE I NUKLEARNE SIGURNOSTI

Nevenka Novosel
Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, Zagreb
nevenka.novosel@dzns.hr

UVOD

Međunarodna suradnja Republike Hrvatske na području radiološke i nuklearne sigurnosti može se podijeliti u dva dijela – politički dio, za koji je nadležno Ministarstvo vanjskih poslova i europskih integracija i tehnički dio, za koji je nadležan Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost.

Temeljem Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti [1], Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost: "koordinira poslove tehničke suradnje s Međunarodnom agencijom za atomsku energiju (IAEA) za sve sudionike iz Republike Hrvatske"; "provodi obveze koje je Republika Hrvatska preuzela prema međunarodnim konvencijama, ugovorima i sporazumima, a odnose se na zaštitu od ionizirajućeg zračenja, nuklearnu sigurnost i primjenu mjera zaštite u svrhu neširenja nuklearnog oružja" i "surađuje s međunarodnim i domaćim organizacijama i društvima s područja zaštite od ionizirajućeg zračenja i nuklearne sigurnosti te imenuje svoje stručne predstavnike koji sudjeluju u radu tih organizacija i društava ili prate njihov rad".

U ovom radu bit će prikazani različiti aspekti tehničke suradnje s IAEA, kao i međunarodne konvencije i bilateralni sporazumi na području radiološke i nuklearne sigurnosti. Također, bit će opisana suradnja s drugim međunarodnim organizacijama i društvima na području radiološke i nuklearne sigurnosti, kao što su Grupa nuklearnih dobavljača, Zangger komisija, Wassenaar aranžman, Organizacija Ugovora o sveobuhvatnoj zabrani nuklearnih pokusa, Europska zajednica za atomsku energiju (Euratom) i odgovarajuće civilne stručne skupine NATO-a.

TEHNIČKA SURADNJA S MEĐUNARODNOM AGENCIJOM ZA ATOMSKU ENERGIJU

Međunarodna agencija za atomsku energiju nezavisna je organizacija Ujedinjenih naroda, specijalizirana za međunarodnu suradnju na

nuklearnom području. Tri glavna područja rada određuju njezinu misiju: sigurnost i zaštita, znanost i tehnologija i mjere jamstva i kontrola. Prema podacima iz studenog 2010. godine, IAEA ima 151 zemlju članicu. Hrvatska je postala zemlja članica IAEA 1993. godine [2].

Program tehničke suradnje je skup svih odobrenih projekata tehničke suradnje u svim zemljama članicama i regijama, kojima se omogućava prijenos nuklearnih i drugih tehnologija u svrhu miroljubivog korištenja nuklearne energije. Putem tečajeva, ekspertnih misija, stipendija, znanstvenih posjeta i nabavke opreme, program tehničke suradnje osigurava potrebne vještine i opremu za uspostavu održivih rješenja za probleme u zemlji ili regiji, koji se mogu riješiti upotrebom nuklearnih tehnika [3].

Projekt tehničke suradnje se planira za postizanje određenih rezultata u određenom vremenu i s određenim proračunom, korištenjem metodologije logičke matrice [4]. Projekte tehničke suradnje predlažu jedna (nacionalni projekt) ili više zemalja članica (regionalni projekt), pregledava osoblje IAEA, a provođenje odobrava Vijeće guvernera IAEA. Financiranje projekata tehničke suradnje osigurava se kroz fond tehničke suradnje i putem izvanproračunskih doprinosa. Programski ciklus traje dvije godine, a proračun se odobrava svake godine.

Nacionalni projekt je projekt odobren za provedbu u pojedinoj zemlji članici. Pojedina zemlja članica može predložiti maksimalno osam nacionalnih projekata u jednom programskom ciklusu, koji moraju biti u skladu s dokumentom *Country Programme Framework* (CPF). CPF je dokument koji opisuje buduću tehničku suradnju između zemlje članice i IAEA u srednjoročnom razdoblju (4-6 godina). U dokumentu su definirani prioriteti tehničke suradnje s IAEA, dogovoreni na nacionalnoj razini [4]. Hrvatska je potpisala prvi CPF dokument 2002. godine a revizija tog dokumenta je u postupku. Financijska sredstva IAEA odobrena za nacionalne projekte u Hrvatskoj iznose oko 800.000 dolara po godini.

Regionalni projekt je projekt tehničke suradnje sročen tako da odgovori na iste ili slične potrebe više zemalja članica u određenoj regiji. U takvim projektima više se koriste grupne aktivnosti, materijali za učenje na daljinu, tehničke mreže, integrirane ekspertne misije i pomoć institucija domaćina [4]. Hrvatska sudjeluje u gotovo svim regionalnim projektima u Europskoj regiji, ali i nudi usluge domaćih institucija i individualnih stručnjaka. Svaka zemlja članica koja sudjeluje u regionalnom projektu mora imenovati nacionalnog koordinatora za pojedini projekt, koji surađuje sa stručnjakom za provedbu projekta u IAEA [2]. Posebna vrsta regionalnog

projekta je interregionalni projekt, u kojem surađuje više zemalja članica iz različitih regija i IAEA.

Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, kao kontakt točka za svu tehničku suradnju s IAEA u Hrvatskoj, imenovao je nacionalnog koordinatora za tehničku suradnju s IAEA (*National Liaison Officer* - NLO) i njegovog pomoćnika (*National Liaison Assistant* - NLA). NLO i NLA su službenici koji koordiniraju aktivnosti programa tehničke suradnje u zemlji i preko kojih se odvija komunikacija s IAEA. Na primjer, NLO pregledava i predlaže za odobrenje prijedloge projekata, te prosljeđuje u IAEA zahtjeve za stipendijama i nominacije kandidata za sudjelovanje na sastancima i tečajevima [4].

Koordinirani istraživački projekti (CRP) su okvir za provođenje istraživačkih aktivnosti koje podupire IAEA. Pomoću CRP-ova se povezuju institucije iz raznih zemalja na rješavanju problema od zajedničkog interesa. Svaki CRP je mreža od 5 – 15 nacionalnih institucija koje provode istraživanje u zainteresiranim zemljama [4].

Istraživački ugovori su ugovorni aranžmani kojima se dodjeljuje financijska pomoć za istraživačke aktivnosti koje su povezane s razvojem tehnike ili opreme od interesa za IAEA program. Ti ugovori se uobičajeno dodjeljuju za istraživačke aktivnosti u okviru CRP-a [4]. Obično se dodjeljuje 3 – 5 istraživačkih ugovora na godinu hrvatskim institucijama koje se bave istraživanjem, u iznosu od oko 5 000 dolara po ugovoru i po godini.

MEĐUNARODNE KONVENCIJE I BILATERALNI SPORAZUMI

Konvencija o nuklearnoj sigurnosti usvojena je 1994. godine, a stupila je na snagu 1996. godine. Konvencija se zasniva na zajedničkom interesu stranaka da postignu visoku razinu nuklearne sigurnosti, koja će se razvijati i promovirati na zajedničkim sastancima stranaka. Konvencija obvezuje stranke da podnesu izvještaj o primjeni obveza iz Konvencije na sastanku stranaka koji se održava svake treće godine u IAEA. Prema podacima iz studenog 2010. godine, ova Konvencija ima 72 stranke [5]. Hrvatska je potpisala i ratificirala Konvenciju o nuklearnoj sigurnosti 1995. godine (Narodne novine – međunarodni ugovori (NN-MU) 13/95). Nacionalni izvještaji o primjeni obveza iz Konvencije pripremljeni su 1998., 2001., 2004., 2007. i 2010. godine [6].

Zajednička konvencija o sigurnosti zbrinjavanja istrošenog goriva i sigurnosti zbrinjavanja radioaktivnog otpada otvorena je za potpis 1997. godine, a stupila je na snagu 2001. godine. Zajednička konvencija primjenjuje se na istrošeno gorivo i radioaktivni otpad iz civilnih nuklearnih

reaktora i primjena, te na istrošeno gorivo i radioaktivni otpad iz vojnih ili obrambenih programa kad su takvi materijali za stalno preneseni i zbrinjavaju se u okviru civilnih programa. Zajednička konvencija se također primjenjuje na planirana i kontrolirana ispuštanja u okoliš tekućih i plinovitih radioaktivnih materijala iz kontroliranih nuklearnih postrojenja. Zajednička konvencija obvezuje stranke da podnesu izvještaj o primjeni obveza iz Zajedničke konvencije na sastanku stranaka koji se održava svake treće godine u IAEA. Prema podacima iz kolovoza 2010. godine, Zajednička konvencija ima 57 stranaka [5]. Hrvatska je potpisala Zajedničku konvenciju 1998. godine, a ratificirala 1999. godine (NN-MU 3/99). Nacionalni izvještaji o primjeni obveza iz Zajedničke konvencije pripremljeni su 2003., 2005. i 2008. godine [6].

Konvencija o fizičkoj zaštiti nuklearnog materijala potpisana je 1980. godine. Ova Konvencija je jedini međunarodni obvezujući instrument na području fizičke zaštite nuklearnog materijala, koji uspostavlja mjere vezane uz sprečavanje, uočavanje i kažnjavanje prekršaja vezanih uz nuklearni materijal. Prema podacima iz rujna 2010. godine, ova Konvencija ima 145 stranaka [5]. Hrvatska je preuzela ovu Konvenciju sukcesijom 1992. godine (NN-MU 12/93 i 5/01). Na diplomatskoj konferenciji 2005. godine, Konvencija je dopunjena i ojačane su njene odredbe. Dopunjena konvencija obvezuje stranke da zaštite nuklearna postrojenja i materijal za vrijeme miroljubive domaće upotrebe, skladištenja i prijevoza. Također omogućava proširenu suradnju između stranaka na primjeni brzih mjera za pronalaženje i vraćanje ukradenog ili krijumčarenog nuklearnog materijala, ograničavanju radioloških posljedica sabotaže i sprečavanju i borbi protiv takvih prekršaja. Prema podacima iz studenog 2010. godine, dopunjena Konvencija ima 43 stranke, ali još nije stupila na snagu [5]. Hrvatska je potpisala izmjene i dopune Konvencije 2005. godine, a ratificirala 2006. godine (NN-MU 5/06).

Konvencija o ranom izvješćivanju o nuklearnoj nesreći je usvojena 1986. godine nakon nesreće u nuklearnoj elektrani Černobil. Ova Konvencija uspostavlja sustav obavještavanja za nuklearne nesreće čiji rezultat može biti prekogranično ispuštanje koje može biti značajno za radiološku sigurnost druge zemlje. Od zemlje se zahtijeva da izvijesti o vremenu nesreće, njezinoj lokaciji, ispuštanju radioaktivnosti i drugim podacima koji su važni za procjenu situacije. Obavještavanje se provodi izravno ili putem IAEA. Prema podacima iz listopada 2010. godine ova Konvencija ima 109 stranaka [5]. Hrvatska je preuzela ovu Konvenciju sukcesijom 1992. godine (NN-MU 12/93 i 1/06). Na temelju ove Konvencije, Hrvatska je potpisala dva bilateralna sporazuma: Sporazum

između Republike Hrvatske i Republike Slovenije o pravodobnoj razmjeni informacija u slučaju radiološke opasnosti (1998. godine, NN-MU 9/98 i 3/00) i Sporazum između Vlade Republike Hrvatske i Vlade Republike Mađarske o pravodobnoj razmjeni informacija u slučaju radiološke opasnosti (1999. godine, NN-MU 11/99). Hrvatska je 2007. godine također potpisala i Sporazum između Euratoma i država nečlanica Europske unije o sudjelovanju potonjih u sustavu Zajednice za ranu razmjenu informacija u slučaju radiološke opasnosti (ECURIE) (NN-MU 8/07). Sporazum se odnosi na sustav obavješćivanja i razmjenu informacija u svim slučajevima u kojima neka od zemalja sudionica ili država članica Euratoma odluči poduzeti mjere opće naravi kako bi zaštitila stanovništvo u slučaju radiološke opasnosti.

Konvencija o pomoći u slučaju nuklearne nesreće ili radiološke opasnosti je usvojena 1986. godine nakon nesreće u nuklearnoj elektrani Černobil. Ova Konvencija uspostavlja međunarodni okvir za suradnju između stranaka i IAEA pri omogućavanju brze pomoći i podrške u slučaju nuklearne nesreće ili radiološke opasnosti. Zemlje obavještavaju IAEA o raspoloživim stručnjacima, opremi i drugim materijalima za osiguranje pomoći. U slučaju zahtjeva za pomoć, svaka stranka odlučuje može li pružiti pomoć i pod kojim uvjetima, a IAEA služi kao točka za kontakt. Prema podacima iz ožujka 2010. godine, ova Konvencija ima 105 stranaka [5]. Hrvatska je preuzela ovu Konvenciju sukcesijom 1992. godine (NN-MU 12/93 i 1/06).

Sporazum između Republike Hrvatske i IAEA o primjeni garancija u svezi s Ugovorom o neširenju nuklearnog oružja, bavi se mjerama za sprečavanje preusmjeravanja nuklearne energije iz miroljubive upotrebe u nuklearno oružje ili druga nuklearna eksplozivna sredstva. Mjere jamstva koje se zahtijevaju ovim Sporazumom primjenjuju se na sve izvorne ili posebne fisibilne materijale u svim miroljubivim nuklearnim aktivnostima na teritoriju stranke, pod njezinom nadležnošću ili provedene pod njezinom kontrolom [5]. Hrvatska je potpisala i ratificirala ovaj Sporazum 1994. godine (NN-MU 13/94). Hrvatska je usvojila revidirani Protokol o malim količinama, koji je dio ovog Sporazuma, 2008. godine (NN-MU 3/08). Temeljem Dodatnog protokola uz Sporazum između Republike Hrvatske i IAEA o primjeni garancija u svezi s Ugovorom o neširenju nuklearnog oružja, Hrvatska prosljeđuje IAEA određene informacije u obliku periodičnih deklaracija, čiji sadržaj je definiran Dodatnim protokolom. Hrvatska je potpisala Dodatni protokol 1998. godine, a ratificirala ga 2000. godine (NN-MU 7/00).

Revidirani dodatni sporazum o pružanju tehničke pomoći Vladi Republike Hrvatske od strane IAEA definira kriterije tehničke suradnje između IAEA i Hrvatske. Hrvatska je potpisala ovaj Sporazum 1997. godine (NN-MU 9/97).

DRUGE MEĐUNARODNE ORGANIZACIJE I DRUŠTVA

Grupa nuklearnih dobavljača (*Nuclear Suppliers Group* - NSG) je skupina zemalja nuklearnih dobavljača koja nastoji pridonijeti neširenju nuklearnog oružja kroz primjenu Smjernica za izvoz nuklearnih i srodnih materijala i opreme. Odluke o primjeni smjernica na izvozne aktivnosti donose se na nacionalnoj razini u skladu s nacionalnim zahtjevima za izdavanje izvoznih dozvola. Trenutno 46 dr*žava sudjeluje u NSG [7]*.

Zangger komisija (Zangger Committee) osnovana je stupanjem na snagu Ugovora o neširenju nuklearnog oružja (NPT), da bi uskladila tumačenje kontrolnih mehanizama za izvoz nuklearnog materijala i opreme među strankama tog Ugovora. Komisija se usredotočila na "posebno projektiranu ili pripremljenu opremu ili materijal za preradu, korištenje ili proizvodnju posebnog fisibilng materijala". Zangger komisija vodi i ažurira tzv. Triger listu (aktivirajući mjere jamstva kao uvjet za nabavku) strateške robe srodne nuklearnoj, kako bi pomogla strankama NPT-a u prepoznavanju opreme i materijala koji su predmet izvozne kontrole. Trenutno Zangger komisija ima 37 članica, uključujući sve zemlje s nuklearnim oružjem [8].

Ministarstvo vanjskih poslova i europskih integracija i Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost su nadležni za suradnju s NSG i Zangger komisijom u Hrvatskoj.

Wassenaar aranžman (*Wassenaar Arrangement*) ustanovljen je u cilju doprinosa regionalnoj i međunarodnoj sigurnosti i stabilnosti, promičući transparentnost i veću odgovornost pri prijenosu konvencionalnog oružja te roba i tehnologija s dvojnom namjenom, a time sprečavajući njihovo destabilizirajuće gomilanje. Zemlje članice (40) nastoje osigurati da prijenos tih roba ne doprinosi razvoju vojnih kapaciteta [9]. Ministarstvo vanjskih poslova i europskih integracija je nadležno za suradnju s Wassenaar aranžmanom, a Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost prati njegov rad.

Organizacija Ugovora o sveobuhvatnoj zabrani nuklearnih pokusa (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization* – CTBTO) uspostavljena je za primjenu odredbi Ugovora o sveobuhvatnoj zabrani nuklearnih pokusa (CTBT). Taj međunarodni Ugovor zabranjuje sve nuklearne eksplozije na Zemlji. Opći alarmni sustav uspostavljen je za

praćenje pridržavanja odredbi Ugovora. 337 uređaja širom svijeta nadziru podzemna, atmosferska i podvodna područja ne bi li izmjerili bilo kakav znak nuklearne eksplozije. Ugovor je otvoren za potpis 1996. godine i prema podacima iz listopada 2009. godine, 182 države su ga potpisale [10]. Hrvatska je potpisala CTBT 1996. godine i ratificirala ga 2001. godine. Vlada Republike Hrvatske je 2006. godine donijela odluku o osnivanju Nacionalnog povjerenstva za primjenu CTBT. Nacionalno povjerenstvo je sastavljeno od predstavnika nekoliko tijela državne uprave, a ravnatelj Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost je predsjednik Nacionalnog povjerenstva. Hrvatski stručnjaci aktivno sudjeluju u obuci i vježbama inspekcije na terenu, koje organizira CTBTO.

Ugovor o uspostavljanju Europske zajednice za atomsku energiju (Euratom) je u početku osmišljen za koordinaciju istraživačkih programa zemalja članica za miroljubivo korištenje nuklearne energije. Jedan od osnovnih ciljeva Euratoma je osigurati svim korisnicima u EU redovito i ravnopravno snabdijevanje rudom i nuklearnim gorivom (izvorni materijal i posebni fisibilni materijal) [11]. Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa 2009. godine imenovalo je dvije nacionalne kontakt osobe za suradnju s Euratomom (Euratom NCP), jednu iz područja nuklearne sigurnosti, a drugu iz područja zaštite od zračenja. Obveze NCP-a su obavještavati zainteresirane stranke u Hrvatskoj o aktivnostima u vezi sa Sedmim okvirnim programom za istraživanje i tehnološki razvoj na području nuklearne fisije i fuzije.

Organizacija Sjevernoatlantskog ugovora (NATO) je međudržavni vojni savez nastao na temelju Sjevernoatlanskog ugovora, koji je potpisan 1949. godine. Organizacija predstavlja sustav zajedničke obrane, gdje su se zemlje članice (28) dogovorile o zajedničkoj obrani u slučaju napada izvana. Hrvatska je postala članica NATO-a 2009. godine. NATO i Hrvatska aktivno surađuju na raznim vojnim i civilnim područjima. Hrvatska sudjeluje u NATO *Army Armaments Group* (NAAG), koja je jedna od tri glavne skupine za naoružanje. *Joint Nuclear, Biological and Chemical Defence Group* je tijelo, koje izvještava NAAG o nuklearnim, biološkim i kemijskim pitanjima u ratnim operacijama i aktivnostima koje nisu ratne. Hrvatska je ojačala nacionalne civilne kapacitete za upravljanje nesrećama i katastrofama u suradnji s NATO-m i sudjelujući u aktivnostima koje organizira *Euro-Atlantic Disaster Response Coordination Centre*. Hrvatska također sudjeluje u radu *Senior Civil Emergency Planning Committee* [12]. Državna uprava za zaštitu i spašavanje i Državni zavod za radiološku i

nuklearnu sigurnost nadležni su za suradnju s navedenim civilnim stručnim skupinama NATO-a.

ZAKLJUČAK

Međunarodna suradnja Republike Hrvatske na području radiološke i nuklearne sigurnosti može se podijeliti u dva dijela – politički dio, za koji je nadležno Ministarstvo vanjskih poslova i europskih integracija i tehnički dio, za koji je nadležan Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost.

U ovom je radu prikazana međunarodna suradnja na području radiološke i nuklearne sigurnosti, koju provodi Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost.

LITERATURA

[1] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Narodne novine 28/2010.

[2] Valčić I, Novosel N. Program tehničke suradnje Međunarodne agencije za atomsku energiju. U: Kubelka D, Kovač J, ur. Zbornik radova Trećeg simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja; 20-22. studenoga 1996; Zagreb, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 1996. str. 43-48.

[3] http://www-tc.iaea.org/tcweb/abouttc

[4] http://www-tc.iaea.org/tcweb/abouttc/terminology/glossary.pdf

[5] http://www.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/index.html

[6] http://www.dzns.hr/izvjesca/nacionalna_izvjesca

[7] http://www.nuclearsuppliersgroup.org/Leng/default.htm

[8] http://www.zanggercommittee.org/Seiten/default.aspx

[9] http://www.wassenaar.org/

[10] http://www.ctbto.org/

[11] http://ec.europa.eu/energy/nuclear/euratom/euratom_en.htm

[12] http://www.nato.int/issues/nato_croatia/index.html

INTERNATIONAL COOPERATION OF THE REPUBLIC OF CROATIA IN THE FIELD OF RADIOLOGICAL AND NUCLEAR SAFETY

Nevenka Novosel
State Office for Radiological and Nuclear Safety, Zagreb, Croatia
nevenka.novosel@dzns.hr

International cooperation of the Republic of Croatia in the field of radiological and nuclear safety can be divided in two parts – political part, for which the Ministry of Foreign Affairs and European Integration is responsible, and technical part, for which the State Office for Radiological and Nuclear Safety is responsible.

According to the Radiological and Nuclear Safety Act (OG 28/10) the State Office for Radiological and Nuclear Safety: "coordinates technical cooperation with the International Atomic Energy Agency for all participants from the Republic of Croatia"; "fulfils the obligations which the Republic of Croatia has assumed through international conventions and bilateral agreements concerning protection against ionising radiation, nuclear safety and the application of protective measures aimed at the non-proliferation of nuclear weapons" and "cooperates with international and domestic organisations and associations in the area of protection against ionising radiation and nuclear safety, and appoints its own expert representatives to take part in the work of such organisations and associations or to monitor their work".

In this paper various aspects of the technical cooperation with the International Atomic Energy Agency, as well as international conventions and bilateral agreements in the field of radiological and nuclear safety, are presented. Also, cooperation with other international organizations and associations in the area of radiological and nuclear safety, such as Nuclear Suppliers Group, the Zangger Committee, the Wassenaar Arrangement, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, Euratom and certain civil expert groups of NATO, is described.

POJMOVNIK IZ MODERNE FIZIKE I ZAŠTITE OD IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Marijana Nodilo[1] *i Tomislav Petković*[2]
[1]Laboratorij za radioekologiju, Zavod za istraživanje mora i okoliša, Institut Ruđer Bošković, Zagreb
[2]Zavod za primijenjenu fiziku, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
mnodilo@irb.hr

UVOD

Pojmovnik je nastao potaknut manjkom stručne literature na hrvatskome jeziku, kao tema za poslijediplomski seminarski rad na Fakultetu elektrotehnike i računarstva i Institutu Ruđer Bošković, ali se proširio na skoro tristo pojmova u poljima moderne fizike, detekcije i zaštite od zračenja.

Korištena je pretežno strana literatura jer nije pronađen sličan pojmovnik na hrvatskome jeziku [1-29]. Uz to, problem pri njegovoj pripremi bio je u nepostojanju hrvatskog nazivlja, a brojni novi pojmovi još nisu u općoj upotrebi u Hrvatskoj i našoj legislativi. Dodatnu poteškoću je predstavljala praksa dijela domaćih autora da ne uvažavaju već objavljena djela drugih autora, nego uvode svoja tumačenja, definicije i nazive pojmova. Poseban izazov predstavljali su prijevodi u duhu hrvatskog jezika za brojne tuđice, posuđenice i skraćenice stranih naziva koje su se spontano udomaćile, te objašnjenja pojmova koji još nisu uvedeni u standardnu upotrebu u Hrvatskoj i njezin zakonodavni i upravni sustav.

Pojmovnik resi širok spektar pojmova iz kemije, zaštite od zračenja, eksperimentalne nuklearne fizike i fizike čestica, a posebna pozornost je posvećena pojmovima iz djelokruga radiokemijskog laboratorija i akceleratorskih postrojenja sa snopovima čestica na nižim energijama.

SADRŽAJ, STIL I SVRHA POJMOVNIKA

Pojmovi se nižu abecednim redom, a mogu se sadržajem, značenjem i opisom razvrstati u više skupina. Polja koja su opisana, temelje se na osnovama moderne fizike, kemije i zaštite od ionizirajućeg zračenja.

Metodološki se započelo od definicije pojma atoma, atomskog broja, masenog broja, izotopa, nukleona, grozda, jezgre, stabilnog izotopa. Atomističko–čestična građa uključuje ion, nabijenu česticu, ionizaciju, ionizirajuće zračenje, neionizirajuće zračenje, nuklearno zračenje. Pažnja je posvećena pojmu i metodama simulacije u suvremenoj fizici, pojmovima i definicijama iz nuklearne fizike i fizike čestica, do onih u visokoenergijskoj fizici. Objašnjeni su inženjerski termini nulto stanje (u radioekološkom smislu), nuklearna depozicija (taloženje), izvor ionizirajućeg zračenja (otvoreni i zatvoreni) te zbrinjavanje radioaktivnog otpada.

Potom su pojašnjeni fenomenološki nuklearni pojmovi vezani uz ionizirajuće zračenje, radionuklide, vrste zračenja, podjelu radionuklida. Razjašnjeni su izrazi i veličine: koncentracija aktivnosti, konstanta radioaktivnog raspada, ozračenje, radioaktivna tvar (materijal), radioaktivni niz, te pojmovi jezgre majke i jezgre kćeri (potomka), radioaktivnost, radioaktivni raspad.

Čitav niz pojmova je posvećen radiokemiji i praktičnom radu s radionuklidima, te detekciji i detektorima.

Ionizirajuće zračenje donosi brojne koristi u znanosti, tehnici i industriji. Budući da u svakom slučaju zdravlje i život izloženih radnika ne smiju biti ugroženi, osnovno i najvažnije jest poštivanje načela radiološke zaštite. Prema Međunarodnoj komisiji za radiološku zaštitu ona su: opravdanost, optimizacija (ALARA, ALARP) i ograničenje. Jednostavnim jezikom: to manja izloženost zračenju, ali da bude dovoljno za ostvarenje cilja.

Pojmovnik detaljno obuhvaća opće pojmove dozimetrije, dozimetre, doze, jedinice, jedinice koje nisu u uporabi, administrativne kontrole i postupke zaštite pri svakodnevnom poslu i izvanrednim situacijama, nadzorne mjere, zdravstvene tegobe i učinke izloženosti ionizirajućem zračenju.

Po prvi put na hrvatskome jeziku pojmovnik donosi objašnjenja vezana uz akceleratore (ubrzivače čestica) i termine njihovog sigurnog rada u akceleratorskim sustavima u trokutu: eksperimentalna radiološka hala – kuća za podatke – glavna kontrolna soba.

S obzirom na posebnu prismotru svih djelovanja u područjima posebnog nadgledanja, definirani su i pojmovi osiguranja i provjere kakvoće.

Opisane su brojne primjene ionizirajućeg zračenja koje su rasprostranjene u znanstvenim i rutinskim analitičkim metodama, ali najviše se primjenjuju kod dobivanja energije (nuklearne elektrane) i u medicini.

Interesantan je pojam *horméze* (grč. *horméso* – staviti u brzo gibanje, natjerivati), općenito upotreba niskih koncentracija otrova i stresora. Prema takvome gledištu, doista vrlo niske koncentracije kronične doze zračenja djeluju poticajno na biološke procese u organizmu.

Obrađeni su i pojašnjeni pojmovi stvoreni i prošireni putem javnih medija. Na primjer, bomba detonator za radiološku ugrozu prirodnog okoliša (*dirty bomb*), *NIMBY* (*N*ot *I*n *M*y *B*ack*y*ard – Ne u mome domu, doslovno: Ne u mome stražnjem dvorištu) do onih u filmskoj umjetnosti (kineski sindrom, *The China Syndrome*).

Pojmovnik uključuje odgovarajuća strukovna društva i organizacije koje se u svome djelokrugu stručno i znanstveno bave istraživanjima u zaštiti od ionizirajućeg zračenja s odgovarajućim propisima, kao što su IRPA, HDZZ, EURATOM, IAEA, ICRP, UNSCEAR.

Postoji čitav niz hrvatskih pojmova, umjesto kojih je, ipak, umjesnije upotrebljavati tuđice. Navedeno se odnosi kad postoji riječ u hrvatskom jeziku, a dvojbeno je koliko dobro može opisati određeni pojam. Za dio pojmova ne postoji riječ u hrvatskom jeziku pa se koristi isključivo tuđica. Poneki pojmovi su pravi izazov za prijevod ili su, pak, u potpunosti neprevodivi.

Poučan je primjer iz slovenskog jezika u kojem postoji naziv za nuklearnu energiju – *jedrska energija* (slov. *jedro* – jezgra) i *tracer* (slov. *sledilnik*).

Određeni komentari navedeni su u skladu s vrijedećim zakonima i pravilnicima.

ZAKLJUČAK

Prema saznanjima autora, izgleda da je ovo prvi hrvatski Pojmovnik koji obrađuje područje zaštite od ionizirajućeg zračenja, s otprilike 300 pojmova i natuknica. Prvi jer počiva na osnovama moderne fizike i kemije, fenomenologije čestica i njihova mjerenja u kontekstu radiološke zaštite istraživača, okoliša i čovječanstva. Ovim putem predstavlja se samo motivacija i sadržaj Pojmovnika. Prva verzija će uskoro biti objavljena u jednome od stručnih časopisa, kako bi doživjela stručnu recenziju i odgovarajuće ispravke te eventualne nadopune.

Zahvala

Autori zahvaljuju suradnicima na brojnim sugestijama te svima koji će svojim primjedbama i dopunama poboljšati Pojmovnik, kako bi koristio u svakodnevnom radu i širenju novih znanja u radiološkoj zaštiti. Posebna hvala ide B. Vekiću na pojašnjenju zakonskih regulativa, te B. Macanu i K. Nodilo na korekturi i jezičnim sugestijama.

Red i odgovornost u pristupu i metodama u mjerenjima niskih – ali nezanemarivih – radioaktivnosti u Laboratoriju za radioekologiju IRB-a, zrcali se i u ovome radu.

LITERATURA

[1] Barišić D. Radionuklidi u tlima Istre. Doktorska disertacija, Zagreb, 1993.

[2] Das A, Ferbel T. Introduction to Nuclear and Particles Physics, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, 1994. ISBN 0-471-57132-6

[3] Friedlander G, Kennedy JW. Nuklearna i radiohemija. Naučna knjiga, Beograd, 1962.

[4] Grahek Ž. Izolacija radioaktivnog stroncija iz prirodnih uzoraka. Doktorska disertacija, Zagreb, 1997.

[5] Knoll GF. Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, 2000. ISBN 0-471-07338-5

[6] Koelzer W. Glossary of Nuclear Terms. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2009 (Nuclear-Glossary 2009-07-01)

[7] Laboratorij za radioekologiju, Institut Ruđer Bošković, Zavod za istraživanje mora i okoliša, interni dokumenti SUK za ISO 17025, Zagreb, 2009.

[8] Lazarić K. Određivanje niskih alfa aktivnosti u prirodnim uzorcima. Magistarski rad, Zagreb, 1984.

[9] Muller RA. Berkeley, Physics 10 – Lecture 06: Radioactivity II. Dostupno na: http://www.youtube.com/watch?v=EHwpqszz-Rc , 2006.

[10] Zakon o zaštiti od ionizirajućeg zračenja i sigurnosti izvora ionizirajućeg zračenja. Narodne novine 64/2006.

[11] Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s radioaktivnim izvorima. Narodne novine 125/2006.
[12] Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s rendgenskim uređajima, akceleratorima i drugim uređajima koji proizvode ionizirajuće zračenje. Narodne novine 125/2006.
[13] Pravilnik o granicama izlaganja ionizirajućem zračenju te o uvjetima izlaganja u posebnim okolnostima i za provedbe intervencija u izvanrednom događaju. Narodne novine 125/2006.
[14] Pravilnik o uvjetima, načinu, mjestima te rokovima sustavnog ispitivanja i praćenja vrste i aktivnosti radioaktivnih tvari u zraku, tlu, moru, rijekama, jezerima, podzemnim vodama, krutim i tekućim oborinama, vodi za piće, hrani i predmetima opće uporabe te stambenim i radnim prostorijama. Narodne novine 60/2008.
[15] Petković T. Eksperimentalna fizika i spoznajna teorija; uključuje Tumač akronima i glosarij, sažetak knjige na hrvatskom i engleskom jeziku te kazala imena i pojmova. Školska knjiga, Zagreb, 2005. ISBN 953-0-60906-X. Drugo promijenjeno izdanje, u tisku, 2011.
[16] Petković T. Predavanja iz Fizike N, skripta, PBF, ak. god. 2010./11., popravljeno izdanje, Zagreb, 2010.
[17] Program dopunskog obrazovanja i obnove znanja o primjeni mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja. Radioaktivni izvori u znanstveno istraživačke svrhe. Državni zavod za zaštitu od zračenja, Zagreb, 2008.
[18] Rožmarić Mačefat M. Određivanje niskih aktivnosti alfa i beta emitera u prirodnim uzorcima. Doktorska disertacija, Zagreb, 2008.
[19] www.bt.cdc.gov/radiation
[20] www.bfs.de/bfs/glossar.html
[21] www.doh.wa.gov/ehp/rp/radgloss.htm
[22] www.epa.gov/rpdweb00/glossary/
[23] www.hps.org_publicinformation_radterms
[24] www.ionactive.co.uk/glossary_atoz.html
[25] www.jlab.org
[26] www.kingcounty.gov/healthservices/health/preparedness/radiation/glossary.aspx
[27] www.ptb.de
[28] www.thefreedictionary.com/
[29] www.wikipedia.org

FIRST GLOSSARY OF MODERN PHYSICS AND IONISING RADIATION PROTECTION IN CROATIAN

Marijana Nodilo[1] *and Tomislav Petković*[2]
[1]Laboratory for radioecology, Division for Marine and Environmental Research, Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
[2]Department of Applied Physics, Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, Zagreb, Croatia
mnodilo@irb.hr

Motivation and encouragement for the Glossary were given as the research theme for the joint seminar between the Faculty of Electrical Engineering and Computing and Ruđer Bošković Institute, within a postgraduate course subject "Detectors and electronic instrumentation for particle physics". A basic motivation is due to a lack of specialized literature in Croatian language in the field of protection of ionising radiation as well as the incompleteness of Croatian terminology in the same field. That is a general problem all over the World because the most glossaries are usually connected either with nuclear power plants or with an application of ionising radiation in medicine. On the other hand, a necessity for the specialized literature for radiation protection which follows a development of modern particle physics and its detection technique is rapidly growing up. A work and development on the Glossary were faced with serious difficulties, since various translations of foreign words and acronyms have already been used by various authors in Croatian literature. Different interpretations of the same term or concept, from diverse sources, had to be very often reconciled. However, the biggest challenge was finding proper Croatian words for the foreign terms, concepts, properties, and quantities which have not yet been commonly used so far in Croatian papers or/and Croatian legislative acts. According to our knowledge this seems to be the first comprehensive Glossary, describing the field of ionising radiation protection and bringing of 300 related entries (terms and guidelines). That is, certainly, the first characteristic *Thesaurus* in Croatian which includes background of modern physics and chemistry, particle phenomenology and its measurement, all dedicated to the radiological protection of workers, environment and people of the World. A Glossary brings a wide spectrum of terms of broad area of chemistry, radiation protection, nuclear and particle physics. A particular attention was paid for the terms and procedures in the laboratories of radiochemistry, and accelerators facilities for the low energies particle beams. A motivation, content, and selected items of the Glossary will be only promoted by this paper. The first full version of the Glossary will be published soon, to be reviewed by users and experts in order to receive their corrections or comments.

EMITEL: E-ENCIKLOPEDIJA I E-RJEČNIK TEHNOLOGIJA MEDICINSKOG OSLIKAVANJA

Mario Medvedec[1], *Nenad Kovačević*[2] *i Ratko Magjarević*[3]
[1]Klinički bolnički centar Zagreb, Klinički zavod za nuklearnu medicinu i zaštitu od zračenja, Zagreb
[2]Klinički bolnički centar Zagreb, Klinika za onkologiju, Zagreb
[3]Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za elektroničke sustave i obradbu informacija, Zagreb
mario.medvedec@kbc-zagreb.hr

UVOD

Područje medicinske fizike, biomedicinskog/kliničkog inženjerstva, medicinske informatike i ostala srodna područja razvijaju se vrlo brzo. Tijekom posljednjih desetljeća uvedene su revolucionarne metode i sustavi za medicinsko oslikavanje, primjerice rentgenska transmisijska računalna tomografija (*Computed Tomography* – CT), oslikavanje magnetnom rezonancijom (*Magnetic Resonance Imaging* – MRI), jednofotonska odašiljačka računalna tomografija (*Single Photon Emission Computed Tomography* – SPECT), pozitronska odašiljačka računalna tomografija (*Positron Emission Tomography* – PET), oslikavanje ultrazvukom, a posljednjeg desetljeća i različiti združeni sustavi višenačinskog (molekularnog) oslikavanja: PET/CT, SPECT/CT i PET/MRI. Sve te i druge napredne metode i tehnologije ulaze u područje biomedicine i zdravstva brzinom koja iziskuje stalno osvježavanje i nadopunjavanje znanja, pri čemu međutim često ne raspolažemo s dovoljno obavijesti i potankosti na jednostavan i brz način.

Elektronička enciklopedija za cjeloživotno učenje o tehnologijama medicinskog oslikavanja (*European Medical Imaging Technology e-Encyclopaedia for Lifelong Learning* – EMITEL) je e-enciklopedija s višejezičnim e-rječnikom pojmovlja tehnologija medicinskog oslikavanja, nastala kao rezultat višegodišnjeg međunarodnog projekta u kojemu je dosad sudjelovalo više od 250 stručnjaka iz 35 zemalja [1,2].

Tijekom prethodnih dvaju projekata, EMERALD (*European Medical Radiation Learning Development*) i EMIT (*European Medical Imaging Technology Training*), izrađeni su vježbovni materijali u obliku e-knjiga i baze podataka medicinskih slika za obrazovanje medicinskih fizičara i

biomedicinskih/kliničkih inženjera. Ti su materijali obuhvaćali dijagnostičku radiologiju, nuklearnu medicinu, radioterapiju te oslikavanje pomoću ultrazvuka i magnetne rezonancije, a rabe se i danas u oko 65 zemalja širom svijeta. Projektu EMIT je 2004. godine u Maastrichtu dodijeljena i posebna nagrada Europske unije (EU) za obrazovanje (*Leonardo da Vinci Award*). Stručni skupovi koji su se održavali tijekom izvođenja projekata EMERALD i EMIT ukazivali su i na potrebu postojanja slobodno dostupnog izvora stručnih obavijesti koji bi sadržavao i višejezični rječnik. Od takvog se alata u World Wide Web okružju očekivalo pružanje obavijesti o metodama, uređajima i opremi u biomedicini i zdravstvu, odnosno sustavno podržavanje trajnog stručnog usavršavanja [1-4].

MATERIJALI I METODE

Početna ideja projekta EMITEL sazrijevala je tijekom razdoblja od 2001. – 2005. godine, a projekt je pripreman za predstavljanje i podnošenje prijavka tijelima EU. U tom je razdoblju projektno partnerstvo uključivalo jezgru suradnih ustanova iz prethodnih projekata: King's College London (ugovaratelj i koordinator) i King's College Hospital NHS Trust, London, Ujedinjeno Kraljevstvo; Universitetssjukhuset i Lund te Lunds Universitet, Lund, Švedska; Universita degli studi di Firenze, Firenca, Italija; AM Studio, Plovdiv, Bugarska; International Organisation for Medical Physics (IOMP). EMITEL je prvi EU-projekt IOMP-a, pa je kao takav utro put i svim daljnjim sličnim međunarodnim projektima [1,2].

Svrha projekta EMITEL bila je razviti izvorni e-alat za cjeloživotno obrazovanje šireg kruga zainteresiranih djelatnika, prvenstveno medicinskih fizičara i biomedicinskih/kliničkih inženjera, ali i radioloških tehnologa, liječnika, medicinskih sestara i drugih struka u svezi. Usporedo s e-enciklopedijom planiran je i razvoj višejezičnog e-rječnika pojmova, koji bi omogućio dvosmjerno unakrižno prevođenje unutar bilo kojeg para u rječnik ugrađenih jezika. Pritom je medicinsko oslikavanje posebno istaknuto u nazivu projekta jer su to tehnologije koje su od velikog značaja, ali i brzog, širokog i dubokog prožimanja sa suvremenom medicinom. U rječnik su, uz radiološke i nuklearnomedicinske tehnologije oslikavanja, uključene i radioterapija i zaštita od zračenja, zajedno s općim pojmovljem iz medicinske fizike i srodnih područja [1,2].

Projekt EMITEL je u razdoblju od 2006. – 2009. financijski potpomognut EU-projektom Leonardo da Vinci, ali također i od projektnih partnera. EMITEL-konzorcij suradnih projektnih ustanova usuglasio se o nastavku svog rada i nakon završetka projekta, osiguravajući trajnu potporu

i osvježavanje projektnih rezultata. Pokretanje projekta EMITEL službeno je najavljeno 2006. godine tijekom Svjetskog kongresa medicinske fizike i biomedicinskog inženjerstva u Seulu, Južna Koreja, (*World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering* – WC2006) [1,2].

Rječnik EMITEL u svojoj je osnovi potekao iz rječnika EMIT (www.emitdictionary.co.uk). Popis natuknica iz tog ranog rječnika je pročišćen i proširen na trenutno u rječnik uključenih oko 3300 aktivnih natuknica iz sedam stručnih područja: dijagnostička radiologija (oko 630 natuknica, udio 19,3 %), nuklearna medicina (oko 550 natuknica, udio 16,8 %), radioterapija (oko 520 natuknica, udio 15,8 %), oslikavanje magnetnom rezonancijom (oko 470 natuknica, udio 14,4 %), zaštita od zračenja (oko 430 natuknica, udio 13,1 %), opći pojmovi (oko 390 natuknica, udio 12,0 %) i oslikavanje ultrazvukom (oko 280 natuknica, udio 8,6 %). Stručnjaci pojedinih struka – izvorni govornici preveli su sve te natuknice na trenutno 28 jezika. Izvornih 7 jezika rječnika EMITEL (engleski, francuski, njemački, švedski, talijanski, španjolski, portugalski) tijekom je vremena nadopunjeno s dodatnim 21 jezikom: finskim, poljskim, češkim, mađarskim, latvijskim, litvanskim, estonskim, rumunjskim, grčkim, turskim, arapskim, tajlandskim, bugarskim, ruskim, bengalskim, perzijskim, kineskim, malajskim, slovenskim, hrvatskim i japanskim. U rječniku se rabi sinkronizirani popis natuknica koji omogućava dvosmjerno unakrižno prevođenje natuknica između bilo koja dva jezika rječnika. Bazu podataka rječnika moguće je proširivati, a posljednje je proširenje uključilo i hrvatski jezik te japanski jezik. Rječnik je smjesta stekao popularnost i trenutno ima više od 2000 korisničkih potraživanja mjesečno. Za očekivati je kako će rječnik EMITEL biti od velike pomoći, osobito u zemljama u razvoju s problemom dostupnosti stručne literature na specifičnom jeziku [1,2,4].

Svaka natuknica iz rječnika je u ekciklopedijskom dijelu objašnjena izravno člankom ili hiperpoveznicom na odgovarajući članak na engleskom jeziku. Svaki je članak pisan otprilike za obrazovnu razinu magistra znanosti, a sastoji se od oko 50 – 500 riječi. Koncept enciklopedije se ostvaruje kroz veći broj specifičnih natuknica s kraćim pojašnjenjima, radije nego kroz manji broj natuknica s člancima od više stranica, kako bi pretraživanje i osvježavanje sadržaja bilo lakše. Uz većinu se natuknica navode izvorišne literaturne referencije i poveznice s drugim natuknicama, čime se obavijesti dodatno proširuju i produbljuju. Mnogi članci koji pojašnjavaju pojedine natuknice sadrže slike, grafikone, tablice, primjere i druge dodatne obavijesti, pri čemu su te dodatne obavijesti često u vezi sa slikama iz prethodnih projekata EMERALD i EMIT. Enciklopediju su

razvijali stručnjaci podijeljeni u osam skupina, uključujući i skupinu razvoja web-programske podrške, pa je pojmovlje rasčlanjeno u sedam kategorija: dijagnostička radiologija, nuklearna medicina, radioterapija, oslikavanje magnetnom rezonancijom, oslikavanje ultrazvukom, zaštita od zračenja i opći pojmovi. Većina natuknica uključuje doprinos tri autora-specijalista, recenzenta i koordinatora skupine [1-4].

Brzi razvoj medicinske fizike, biomedicinskog/kliničkog inženjerstva i medicinske informatike rezultira i nizom kratica (akronima) i istoznačnica (sinonima). U cilju prevladavanja tog problema, u web je sjedište ugrađena druga tražilica koja pretražuje cjelovite tekstove na engleskom jeziku, te prikazuje sva ona pojašnjenja natuknica u kojima se spominje određena istoznačnica. Web-sjedište rabi mogućnosti internetskih prebirnika glede rada s različitim jezicima, pa povezuje i objedinjuje rječnik s enciklopedijom. Na taj način svaki prevedeni pojam dolazi s hiperpoveznicom na odgovarajuće pojašnjenje. Višejezična tražilica radi sa svim jezicima rječnika. Web-sjedište EMITEL (www.emitel2.eu) uz bazu podataka sadrži i unutarnje web-sjedište sa sustavom za upravljanje sadržajem (*Content Management System* – CMS). CMS omogućava buduće uređivanje postojećih natuknica i njihovih pojašnjenja, ali jednako tako i dodavanja novih natuknica, dodavanja novih obavijesti, slika, dijagrama, tablica i dr. EMITEL bi tako trebao djelovati kao wikipedija medicinske fizike i biomedicinskog/kliničkog inženjerstva, a samo bi unosi provjereni i prihvaćeni od strane uredništva mogli biti postavljani dijelom sadržaja njegovog web-sjedišta. Izvorno web-sjedište EMITEL izradila je bugarska tvrtka AM Studio iz Plovdiva [1,2].

Između stotinjak stručnjaka – autora i recenzenata koji su doprinjeli sadržaju enciklopedije sudjelovao je i jedan biomedicinski inženjer iz Hrvatske. Predstavljanje i promicanje projekta EMITEL u rujnu 2009. godine tijekom Svjetskog kongresa medicinske fizike i biomedicinskog inženjerstva u Münchenu, Njemačka (*World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering* – WC2009) bio je ključni događaj za proširenje rječnika hrvatskim jezikom. Slijedom osobnog kontakta i izraženog interesa za prevođenjem u ime Hrvatskog društva za medicinsku i biološku tehniku (HDMBT), krajem rujna 2009. svim je članovima HDMBT, a posredno i svekolikoj zainteresiranoj stručnoj zajednici postala raspoloživa izvorna Excel-datoteka EMITEL-rječnika s natuknicama na engleskom jeziku. Datoteka je zadržavala oko 4400 natuknica, od kojih je u tadašnjoj fazi projekta valjalo obvezno prevesti oko 3300 natuknica. Početkom studenog 2009. u prevođenje se uključilo daljnjih 10 stručnjaka

u koordinaciji Sekcije za medicinsku fiziku HDMBT. Sredinom veljače 2010. započela je recenzija prijevoda u kojoj je sudjelovalo daljnjih 6 stručnjaka i iz Sekcije za kliničko inženjerstvo HDMBT. Recenzija je okončana sredinom ožujka 2009., a hrvatski je jezik u online rječnik EMITEL ugrađen u travnju 2010. U izradbi hrvatske inačice rječnika tijekom šest mjeseci sinergijski je sudjelovalo ukupno 17 prevoditelja i recenzenata iz osam institucija i tri grada – 11 medicinskih fizičara, 3 biomedicinska/klinička inženjera, 2 radiokemičara i 1 jezikoslovac, koji su preveli i recenzirali svih 4400 natuknica. Pritom su temeljna načela rada bila prvenstveno konačna razumljivost nazivlja, poželjna hrvatska izvornost te jezikoslovna primjerenost [1,2,5].

ZAKLJUČAK

Hrvatskim se doprinosom u sadašnjoj fazi međunarodnog projekta EMITEL pokušalo upotpuniti i poboljšati kakvoću i učinkovitost specifičnog stručnog, znanstvenog i nastavnog terminološkog okružja putem izgradnje ujednačenog i ovjerovljenog nazivlja namijenjenog stručnjacima u području tehnologija medicinskog oslikavanja te svim drugim zainteresiranim strukama i svekolikoj zainteresiranoj javnosti.

Zahvala

U svoje osobno ime i u ime konzorcija EMITEL autori izražavaju najdublju zahvalnost svim suradnicama i suradnicima koji su dragovoljno i bez naknade sudjelovali u izradbi hrvatske inačice rječnika EMITEL.

LITERATURA

[1] Tabakov S, Smith P, Milano F, Strand SE, Lewis C. Encyclopedia of medical physics (preprint). London: CPI Antony Rowe; 2010.

[2] EMITEL e-Encyclopaedia of medical physics and multilingual dictionary of terms. EMITEL Consortium; 2008. Dostupno na: http://preview.emitel2.eu/emitwwwsql/project.aspx

[3] Emerald. Dostupno na: http://emerald2.eu/emerald/index.htm

[4] Emit. Dostupno na: http://emerald2.eu/emit/index.htm

[5] Projekt hrvatsko strukovno nazivlje – projekt koordinacije (STRUNA). Institut za hrvatski jezik i jezikoslovlje. Dostupno na: http://www.ihjj.hr/dokumenti/Brosura_NZZ.pdf

EMITEL: E-ENCYCLOPAEDIA AND E-DICTIONARY OF MEDICAL IMAGING TECHNOLOGIES

Mario Medvedec[1], Nenad Kovacevic[2] and Ratko Magjarevic[3]
[1]University Hospital Centre Zagreb, Department of Nuclear Medicine and Radiation Protection, Zagreb, Croatia
[2]University Hospital Centre Zagreb, Department of Oncology, Zagreb, Croatia
[3]Faculty of Electrical Engineering and Computing, Department of Electronic Systems and Information Processing, Zagreb, Croatia
mario.medvedec@kbc-zagreb.hr

EMITEL (*European Medical Imaging Technology e-Encyclopaedia for Lifelong Learning*) is an electronic encyclopaedia and multilingual dictionary related to medical imaging technologies. It is a result of the multi-annual international project which involved more than 250 contributors from 35 countries, aiming to foster development of medical physics and biomedical/clinical engineering by a lifelong e-learning web tool for all interested individuals or groups. Currently, the encyclopaedia is equivalent to about 2100 hard copy pages and includes about 3300 terms with an explanatory article for each term. The dictionary provides bidirectional cross-translation of terms between any two among 28 languages from its current database. Dictionary entries are divided into seven groups: diagnostic radiology, nuclear medicine, radiotherapy, magnetic resonance imaging, ultrasound imaging, radiation protection and general terms.

Croatian language was implemented in EMITEL dictionary in April 2010. There were 17 Croatian translators and reviewers from 8 institutions and 3 cities, ranging from medical physics experts to linguist. The basic terminological principles of translation were final intelligibility of terms, desirable Croatian origin and linguistic appropriateness. Croatian contribution in the actual phase of EMITEL project attempted to improve the quality and efficiency of the specific professional, scientific and teaching terminology. A sort of novel, consistent and verified pool of terms of emerging medical imaging technologies was built up, as a one small part of the process of developing information technologies and socio-cultural transition from the industrial society into the society of knowledge.

ISTAKNUTI HRVATSKI PRIRODOZNANSTVENICI NA POLJU ZNANOSTI O ZRAČENJU DO 1945. GODINE

Branko Hanžek[1], Zdenko Franić[2] i Gina Branica[2]
[1]Hrvatska akademija znanosti i umjetnosti, Zavod za povijest i filozofiju znanosti, Zagreb
[2]Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Jedinica za zaštitu od zračenja, Zagreb
bhanzek@hazu.hr , zdenko.franic@imi.hr , gina.branica@imi.hr

UVOD

Osim što su bili prve potencijalne žrtve izvora ionizirajućeg zračenja, fizičari i kemičari su prvi upozorili na štetni utjecaj tog zračenja na živi svijet. Liječnici i ostali postajali su žrtvama zračenja kasnije, nakon dugotrajnog i kumulativnog djelovanja štetnog zračenja. U ovom pregledu povijesti znanosti o zračenju u nas, utemeljenom na dostupnim literaturnim izvorima [1-5], pozornost ćemo posvetiti onima prvima.

PREGLED I DJELATNOST PRIRODOZNASTVENIKA

Vinko Dvořák

Fizičar Vinko Dvořák (1848. − 1922.), prvi profesor fizike na osuvremenjenom Sveučilištu u Zagrebu, među prvima je iskoristio Röntgenovo otkriće. Sažetak njegove djelatnosti je kako slijedi:

- 22. 1. 1896. nabavio 2 rendgenograma
- 30. 5. 1896. nabavio rendgensku cijev
- 1897. nabavio novu rendgensku cijev (inv. broj 861)
- 28. 6. 1897. nabavio rendgensku cijev (inv. broj 891)
- 7. 1897. Zboru liječnika održao predavanje i pokazao rendgenogram vlastite ruke
- 1897. godine nabavio fluorescentni zastor
- 25. 11. 1897. snimio slomljenu ruku nadvojvode Leopolda Salvatora
- 18. 3. 1909. nabavio novu rendgensku cijev (inv. broj 896)
- 1910. nova rendgenska cijev (inv. broj 1070).

Peter Salcher

Fizičar Peter Salcher (1848. – 1928.) bio je riječki profesor fizike na Mornaričkoj akademiji. 20. veljače 1896. godine nakon predavanja o Röntgenovom otkriću prikazao je Riječanima prvu demonstraciju primjene X-zračenja, prikazavši rendgenogram ruke barunice Vranyczany. Akademskoj javnosti poznatiji je po snimanju ultra brze fotografije taneta u letu u suradnji s prof. Ernstom Machom. Zahvaljujući njemu, 1897. godine Rijeka je nabavila prvi rendgenski uređaj. U tom kontekstu valja napomenuti da se u Zagrebu prvi rendgenski uređaj nabavlja tek godine 1901. na poticaj kirurga dr. Wickerhausera u Bolnici sestara milosrdnica u Zagrebu, a Ogulin, Šibenik, Zadar i Dubrovnik su prve rendgenske uređaje nabavili još godine 1898.

Oton Kučera

Fizičar Oton Kučera (1857. – 1931.) napisao je u *Vijencu* 1897. godine prvi opsežan članak pod nazivom "Rentgenove zrake X" i to u dva dijela. U članku je uz temeljiti prikaz pronalaska X-zračenja predvidio i prvu primjenu u medicini i tehnici. U knjizi "Valovi i zrake" Otona Kučere 1903. godine date su slike Röntgenovih fotografija načinjenih djelovanjem X- zraka na foto ploču. Kučera u *Glasniku Hrvatskog naravnoslovnoga društva* iz 1903. prenosi informacije o djelovanju elektromagnetskih valova na mozak.

Mile Cindrić

Fizičar Mile Cindrić (1869. – 1939.), koji je povremeno radio i u fizikalnom kabinetu zamjenjujući jedinog Dvořákovog asistenta Dušana Pejnovića, napisao je 1905. godine u *Nastavnom vjesniku* članak pod nazivom "O elektriziranju s pomoću plamena i Becquerelovih zraka". U tom je članku opisao pokuse koji su povezani s elektriziranjem pomoću Becquerelovih zraka. Kako u to doba nije bilo uzoraka radioaktivnih tvari, Cindrić se korisno dosjetio da se na dobro očišćene pločice stupa cink-bakar stavi prah od Auerovih mrežica. Naime u Auerovim mrežicama ima radioaktivnog elementa torija koji emitira Becquerelove zrake i ionizira zrak oko sebe. Pločice od bakra i cinka djeluju tako da se ti ioni razluče, te pozitivni predaju svoj električni naboj bakrenoj, a negativni cinkovoj pločici.

Stanko Hondl

Fizičar Stanko Hondl (1873. – 1971.), Dvořákov nasljednik na mjestu profesora fizike na Sveučilištu u Zagrebu. Predavao je fiziku na

medicinskom fakultetu od ljetnog semestra 1917./18. do ljetnog semestra 1934./35. Godine 1912. je pisao u *Nastavnom vjesniku* o fizikalnim jedinicama. Objasnio je kako je *Međunarodni kongres za radiologiju i elektricitet* u Briselu 1910. godine izabrao međunarodno povjerenstvo za radijev standard te je uzet standard Marie Curie od 21,99 mg $RaCl_2$. Sažetak daljnje njegove djelatnosti je kako slijedi:

- 1913. nabavio je rendgensku cijev (inv. broj 1142), a 1938. 3 rendgenske cijevi (inv. brojevi 2005, 2015 i 2019)
- 5. 6. 1926. nabavio rendgenski aparat
- 1937. nabavio naočale s olovnim staklom (inv. broj 1891)
- 1938. nabavio 1 mg radija (inv. broj 2020).

Eduard Ante (Slavoljub) Brixy (Bernardo)

Fizičar Slavoljub Brixy (1882. – 1946.) je široj javnosti poznat kao pisac prve stručne knjige o radiju na Balkanu koju je napisao godine 1925. godine kao profesor na franjevačkom učilištu u Varaždinu i nadbiskupskoj visokoj školi u Zagrebu. Studirao je matematiku i fiziku i uz pomoć profesora Hondla bavio se problemom interferencije rendgenskih zraka. U članku objavljenom u *Hrvatskoj prosvjeti* 1916. godine piše o rendgenskim zrakama, ali se obazire i na najnovija otkrića. Manje je poznato da je u tom članku upozorio na opasnost od rendgenskih zraka za liječnike, koji su nakon 3 do 11 godina izloženosti zadobivali opekline ruku. Brixy navodi da je 1908. godine u Bostonu zabilježeno 47 slučajeva od kojih se 36 razvilo u rak, a 1909. umro je dr. Gustav Opitz "od rendgenskog oštećenja".

Josip Olujić

Fizičar fra Josip Olujić (1888. – 1944.) doktorirao je 1918. na Sveučilištu u Fribourgu (tada u Švicarskoj) na pobudu prof. A. Gockela koji je prvi u svijetu 1910. godine mjerio pražnjenje elektroskopa zbog zračenja i to pri uspinjanju balona do 4500 metara. Tema disertacije bila je: *Beiträge zur Messung Radium-emanation in der Atmosphäre* (Doprinosi mjerenju radijeva zračenja u atmosferi). Olujić je, nakon povratka u Hrvatsku odmah nakon završenog doktorata, predavajući na Franjevačkoj gimnaziji u Sinju, kontaktirao JAZU oko nabavke elektrometra (1921. godine, dopis br. 174 i 1923. godine, dopis br. 252). Ti podaci su preuzeti iz urudžbenog zapisnika HAZU. U dopisu br. 174. iz 1921. fra Jozo Olujić je obavijestio JAZU da je za elektrometar određeno 7000 tadašnjih kruna. U dopisu br. 252 iz 1923. godine fra Olujić piše da je prije godinu dana kupio elektrometar od firme

Spindler & Hoyer u Göttingenu, a za mjerenje radijeve emanacije u zraku. Olujić u drugom dopisu moli da mu povrate novac koji je on isplatio za taj elektrometar (u to vrijeme najbolja verzija po Schmidtu) i to da se vrati podružnici Zadružne gospodarske banke u Splitu. Tako je utanačeno da po uplati elektrometar postaje vlasništvo Akademije, a s njime će se služiti Olujić. Akademija javlja da je doznačila isplatu i to od 1750 dinara te moli Olujića da uredi pitanje vlasništva. Kako je uspio nabaviti samo taj jedan kvalitetni uređaj, nije uspio realizirati svoju ideju da oformi čitav niz promatračkih postaja koje bi mjerile ionizirajuće zračenje u Hrvatskoj. Tako je Olujić bio prvi kvalificirani idejni preteča znanosti o zračenju na tlu Hrvatske na egzaktnim, mjeriteljskim pokazateljima. Ovi podaci do sada su bili potpuno nepoznati i široj i užoj akademskoj javnosti.

Franjo Brössler

Fizičar Franjo Brössler (1893. – 1953.) doktorirao je 1919. godine u Beču iz područja radioaktivnosti pod vodstvom prof. dr. St. Meyera. Nakon povratka u Hrvatsku godine 1920. i 1921. radio je kao kustos u geološko-paleološkom odjelu zemaljskog (tada Narodnog) muzeja u Zagrebu kao ekspert za istraživanje radioaktivnosti termalnih voda i tla. Danas je to Prirodoslovni muzej u Demetrovoj 1. U više je navrata putovao u Beč kako bi preuzeo skupocjenu opremu (Wulfove elektrometre s dvije niti s posudom za ionizaciju) koja je ondje bila i baždarena. O svojim istraživanjima pisao je u člancima: "Novi radioaktivni element" (*Priroda*, 1921;5:98-99), "Nešto o istraživanju radioaktivnosti voda u Daruvaru" (*Naša domovina* 1/1921;6:4-5), "Razbijanje dušikovog atoma" i o izgradnji elemenata iz vodika (*Revue chimiqe*, 1/1921; 3/4:42-48; 5/6:74-80). Kako je o Brössleru do sada minorno pisano, ovi podaci potpuno su nepoznati i široj i užoj akademskoj javnosti.

Vladimir Glumac

Vladimir Glumac, dipl. phil. (1904. – 1960.), diplomirao je na smjeru primijenjena matematika te je široj akademskoj javnosti dosad potpuno nepoznat. Od 1. 5. 1930. do 1. 11. 1931. radio je u Jugoslavenskom Siemensu d.d. na elektro-medicinskom odsjeku kao fizičar. Izveo je projekt zaštite od rendgenskog zračenja u Bolnici sestara milosrdnica 1931. godine. Na Sveslavenskom liječničkom kongresu u Splitu od 5. do 8. 10. 1930. godine kao fizičar je sudjelovao s predavanjem "Dozimetrija rendgenskog zračenja sa demonstracijama", a to predavanje je imalo karakter izvornog znanstvenog rada. Drugi izvorni znanstveni rad objavio je u časopisu *Ars*

Therapeutica 1934. godine pod nazivom "Dužnost rendgenskog pregledavanja".

Danijel Uvanović

Danijel Uvanović (1908. – 1948.) je široj akademskoj javnosti dosada potpuno nepoznat. Znanstveni je publicist iz matematike i prirodoslovlja i tehnike, a najviše je pisao u dnevniku *Hrvatska straža*. Tako je godine 1930. u br. 295 na str. 3. pisao o izgradnji instituta za liječenje raka pomoću radija. U tom je članku naveo da će institut imati dva odjela: opći, kojim će ravnati dr. J. Körbler i ginekološki kojim će ravnati dr. Vidaković. Člankom su navedene zadaće tog instituta, a kao metoda liječenja radioterapijom navedena je bakteriologijska metoda. Uvanović je u svom članku u *Hrvatskoj straži* br. 249, str. 5. od 29. 10. 1930. upozorio na žrtvu znanosti medu liječnicima.

Mladen Paić

Kemičar i fizičar Mladen Paić (1905. – 1997.) doktorirao je 1932. na Tehničkom fakultetu u Zagrebu iz područja tehnike (kemija) s disertacija pod nazivom "Primjena Debye-Scherrerove metode na kemijske probleme". Godine 1933. postigao je na Sorboni doktorat iz fizičkih znanosti. U svezi s disertacijom iz Zagreba valja istaknuti da je jedan njen izvadak objavljen u *Arhivu za hemiju i farmaciju* (Zagreb, 1933;5:143-146). Izvadak je objavljen pod nazivom "Osjetljivost Debye-Scherrerove metode". Kao podnaslov je navedeno "Mogućnost njene upotrebe u kvantitativnoj analizi". U izvadku se ističe da kod proučavanja kompleksnih kemijskih sustava nije moguće neke spojeve rendgenografski dokazati. Kao obrazloženje slabe osjetljivosti navedeni su ovi uzroci: "upotrijebljeno zračenje nije monokromatsko, pojava fluorescentne radijacije koja jednolično zacrnjuje film, pojava Comptonovog zračenja što opet dodatno zacrnjuje film, veliki broj linija dovodi do međusobnog stapanja i dočaravanja kontinuiranog zacrnjenja". Ovaj zadnji uzrok može poticati i od nesavršeno izgrađene prostorne rešetke ili amorfnih supstanci. Prva se tri uzroka mogu značajno smanjiti pa se tako može povećati osjetljivost metode. Pritom je "značajno i to da se mjerenja načine sa što više parova linija jer tako sigurnost mjerenja raste", zaključio je na kraju Paić.

Marin Katalinić

Marin Katalinić (1887. – 1959.) je od 1935. do 1943. predavač fizike za medicinare na Medicinskom fakultetu. Dana 26. 3. 1935. održao je na

Pučkom Sveučilištu predavanje pred 120 slušatelja pod nazivom "Umjetno stvaranje radioaktivnih elemenata". Od 1937. do 1945. godine bavio se atomskom fizikom. 1940. godine objavio je sliku tragova alfa čestica na foto ploči, a koji potiču od radija. Godine 1943. utemeljio je treći odjel Fizikalnog zavoda odnosno laboratorij za atomsku fiziku. Iste godine s asistentom B. Markovićem izložio je foto ploče utjecaju "visinskih zraka" (kozmičkom zračenju) te ih kasnije razvio i istraživao pod mikroskopom.

Ivan Supek

Akademik Ivan Supek (1915. – 2007.), hrvatski fizičar, filozof, pisac, borac za mir i humanist također je značajno pridonio i znanosti o zračenju. U članku "Kozmičke zrake" objavljenom u *Nastavnom vjesniku* iz godine 1940./41. iznio je niz zanimljivih i aktualnih informacija o toj tematici. Uredništvo je taj članak pozdravilo komentarom navodeći da je Supek "đak Heisenberga, jednog od vođa fizike", ali je napomenulo i to da članak nema namjeru dati kritički prikaz tog područja moderne fizike. U članku je Supek dao povijesni prikaz tematike sve od Wilsona iz 1900. godine pa preko Rutherforda 1907., Hessa 1912., Heisenberga i Schrödingera sve do Diraca i Andersona, jer je ispitivanje kozmičkih zraka dobilo gotovo presudno značenje u razvoju kvantne teorije. Kao rezultat sveukupnog teorijskog i eksperimentalnog rada moglo se izreći da su kozmičke zrake pozitroni i elektroni koji se velikim brzinama, bliskim svjetlosnim, kreću svemirom i udaranjem u našu atmosferu prouzrokuju niz složenih fizikalnih procesa. Supek daje i crtež jedne kaskade iz kojeg se vidi da pri prolasku svemirskog elektrona kroz olovo nastaju gubici njegove energije emitiranjem kvanata svjetlosti koji proizvode parove elektron-pozitron. Članak je dopunjen poglavljima o zakočnom zračenju i tvorbi parova. Zanimljivo je da u ovom drugom poglavlju Supek govori o Jukawinim teorijskim predviđanjima jedne nove čestice mase dvjestotinjak puta veće nego što je masa elektrona. Ti teški elektroni su zaista nakon tri godine i otkriveni i dobili ime mezotron (danas: mezon). Supek je 1941. godine napisao knjigu "Svijet atoma". U toj je knjizi na 396 stranica te 15 slika dao prvi popularni opsežni prikaz kvantne teorije u njezinim primjenama na raznim područjima atomske fizike u formi knjige. U knjizi se nalaze ova poglavlja: klasična mehanika, svjetlost kao valno gibanje, elektromagnetizam, klasični rezultati ispitivanja atoma, o prostoru i vremenu, kvantna teorija, atomi, molekule i kristali, atomne jezgre, kozmičke zrake, problem života, mutacije. U tom zadnjem poglavlju Supek ističe da pod djelovanjem α, β, i γ zraka kao i katodnog zračenja ugibaju bakterije. Govori se i o mutacijama gena umjetno

proizvedenim pomoću obasjavanja rendgenskim zrakama, doduše samo u eksperimentima izvršenim na mušici *Drosophila*.

Božo Metzger

Fizičar Božo Metzger (4.3.1913.) je od 1942. do 1945. kao docent na katedri za fiziku Veterinarskog fakulteta predavao fiziku za veterinare i u okviru predavanja detaljno tumačio rendgenske zrake, građu atoma i radioaktivnost. Zajedno s navedenim temama također je spominjao zaštitu od štetnog zračenja. Također, predavao je i o određivanju doze za potrebne rendgenske terapije i primjeni radioaktivnosti u medicini. O njemu, kao i o Dragutinu Mayeru (1912. – 2010.) opširno je pisano u časopisu *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* [5].

ZAKLJUČAK

Ovaj kratki prikaz zbog ograničenoga prostora prikazuje djelatnost samo nekih hrvatskih prirodoznanstvenika na području znanosti o zračenju u Hrvatskoj u periodu do kraja 2. svjetskog rata. Vidljivo je da efektivni počeci znanosti o zračenju, pa tako i zaštite od zračenja, na području Hrvatske sežu čak do druge polovice 19. stoljeća. Pretraga arhivske građe i dostupne literature, te uvid u život i rad nekih od tih doajena znanosti o zračenju i zaštite od zračenja u Hrvatskoj, omogućili su da se sustavnije zabilježe i obrade brojne, do sada nepoznate, činjenice i detalji važni ne samo za povijest i razvoj znanosti o zračenju, nego i medicinske fizike u Hrvatskoj. Sve to pokazuje da Hrvatska od samoga početka ne samo da slijedi najsuvremenije znanstvene spoznaje iz tih područja već i njima aktivno pridonosi. Međutim, za širi i sustavniji prikaz te problematike potrebna su daljnja istraživanja.

LITERATURA

[1] Arhiv Rektorata Sveučilišta u Zagrebu

[2] Arhiv HAZU

[3] Arhiv Filozofskog fakulteta

[4] Hondl S. Fizika za više razrede srednjih škola. Zagreb: Trošak i naklada Pokrajinske uprave, Odjeljenja za prosvjetu i vjeru; 1922.

[5] Hanžek B, Franić Z. Dragutin Mayer i Božo Metzger – velikani znanosti o zračenju i zaštite od zračenja u Hrvatskoj. Arhiv za higijenu rada i toksikologiju 2010;61(4):479-498.

NOTABLE CROATIAN SCIENTISTS IN THE FIELD OF RADIATION SCIENCE UNTIL YEAR 1945

Branko Hanžek[1], Zdenko Franić[2] and Gina Branica[2]
[1]Croatian Academy of Sciences and Arts,
Institute for History and Philosophy of Science, Zagreb, Croatia
[2]Institute for Medical Research and Occupational Health,
Radiation Protection Unit, Zagreb, Croatia
bhanzek@hazu.hr , zdenko.franic@imi.hr , gina.branica@imi.hr

Apart from being among first potential victims of exposure to ionising radiation, physicists and chemists were also first to warn about harmful effects of radiation to living organisms. Physicians as well as some other professionals were first to experience consequences of prolonged and cumulative exposure to ionising radiation. In this paper the work of first notable scientists in the field of radiation science in Croatia until year 1945 is discussed. It is evident that effective beginning of radiation science in Croatia, as well as radiation protection in Croatia can be traced to the end of 19th century. Search of archives and known literature not only gave insight to life and work of some of these radiation science doyens but also enabled for more systematic recollections of previously unknown facts and details important for history and development of radiation science, radiation protection as well as medical physics. Consequently, it can be concluded that Croatia from the very beginning not only followed all contemporary scientific knowledge from this fields but also made notable contributions. However, the need for larger and more systematic review of this problematic calls for further research.

DOZIMETRIJA ZRAČENJA I INSTRUMENTACIJA

RADIATION DOSIMETRY AND INSTRUMENTATION

FIZIKALNI PRINCIPI RADA NEKIH SUVREMENIH DETEKTORA IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA

Dinko Babić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
dbabic@imi.hr

UVOD

U eksperimentalnoj fizici ima jedno zlatno pravilo: treba mjeriti električnim putem, pritom izbjegavajući suvišne pretvorbe ostalih oblika energije u električnu energiju. Primjena tog principa u detekciji ionizirajućeg zračenja ostvarena je u cijelosti upotrebom poluvodičkih naprava [1-3], o čemu je u ovom preglednom radu riječ. Opisane su osnove rada dvaju suvremenih i čestih detektora: HPGe (*High Purity Germanium*) detektora fotona i PIPS (*Passivated Implanted Planar Silicon*) detektora nabijenih čestica. Naglasak je stavljen na pojednostavljeno razmatranje temeljnih principa njihove operacije, u vjeri da će se to pokazati korisnim onima koji se bave različitim aspektima detekcije ionizirajućeg zračenja a fizika nije njihova uža struka.

DOPIRANI POLUVODIČI I p-n SPOJ

U monokristalnim intrinsičnom Ge i Si energija pobuđenja električki vodljivog naboja (slobodnih elektrona i šupljina) je $E_g \sim 1$ eV $\sim 10^4$ K. Stoga je na sobnoj temperaturi (T) električna vodljivost mala, jer je određena stvaranjem vodljivog naboja termičkom aktivacijom s faktorom $\exp(-E_g / 2\, k_B\, T)$, gdje je k_B Boltzmannova konstanta [4]. Odstupanja od idealne kristaliničnosti povećavaju vodljivost. Defekti u kristalnoj strukturi stvaraju lokalizirana stanja slabo vezanih elektrona koja su podložnija termičkoj aktivaciji što uvećava vodljivost. Još jači učinak ima dopiranje poluvodiča drugim elementima. **Donori** uvode višak elektrona te stvaraju n-tip poluvodiča, a **akceptori** uvode višak šupljina i stvaraju p-tip. Energija termičke aktivacije je za te dodane elektrone i šupljine relativno mala, 10 – 100 meV, pa se vodljivost dopiranjem znatno povećava. Zbog tih je svojstava kontrola nad kemijskom i strukturnom čistoćom imperativ u poluvodičkoj tehnologiji.

Slika 1. (a) p-n spoj bez narinutog napona; (b) propusna polarizacija; (c) nepropusna polarizacija.

Dovedu li se n i p poluvodiči u kontakt (Slika 1 (a)), na samom p-n spoju stvori se područje bez vodljivog naboja – **područje osiromašenja**. Primijeni li se preko p-n spoja električni napon kao na Slici 1 (b), područje osiromašenja se smanji i preko njega teče električna struja; tu polarizaciju nazivamo **propusnom**. Pri suprotnoj polarizaciji (Slika 1 (c)), područje osiromašenja se širi, a struja preko spoja je neznatna; tu polarizaciju nazivamo **nepropusnom**. Napose, u idealnom slučaju nepropusne polarizacije, puls električne struje mogu dati samo elektron-šupljina parovi koji su stvoreni u području osiromašenja depozicijom energije izvana, i taj princip koriste spomenuti HPGe i PIPS detektori. Stoga je izvidno da efikasna detekcija zahtijeva minimizaciju parazitske struje preko p-n spoja u režimu nepropusne polarizacije.

VISOKOENERGIJSKO ZRAČENJE I POLUVODIČ

Poluvodič je za visokoenergijsko zračenje ionizacijska komora u čvrstom stanju, a gibanje naboja stvorenog ionizacijom može se direktno obrađivati u vidu električnog signala. Detalji stvaranja elektron-šupljina parova ionizirajućim zračenjem nisu do kraja razjašnjeni, ali zna se da mehanizmi ionizacije uključuju raspršenje na elektronskom oblaku za nabijene čestice, te, za fotone, fotoelektrični efekt, Comptonov efekt i tvorbu elektron-pozitron parova. Energija E_p za stvaranje jednog para neovisna je o vrsti i energiji ionizirajuće čestice, vrlo slabo ovisi temperaturi i specifična je za svaki materijal [3,4]. Za nedopirani Si je E_p = 3,62 eV na 300 K, a za nedopirani Ge je E_p = 2,95 eV na 80 K; višak

energije iznad E_g = 1,12 eV (Si) i E_g = 0,73 eV (Ge) predaje se kristalu u vidu titranja kristalne rešetke. Te se vrijednosti uzimaju u obzir pri oblikovanju detektora, zajedno s prirodom zračenja koje se detektira i tehnološkim mogućnostima oblikovanja materijala.

HPGe DETEKTORI VISOKOENERGIJSKIH FOTONA

Zbog velike dubine prodiranja visokoenergijskih fotona u materiju, njihova detekcija zahtijeva znatan omjer aktivnog volumena i površine upada. Kao prikladan materijal nameće se Ge, kojeg je moguće proizvesti u obliku masivnih monokristala, a ima i veći udarni presjek za visoko-energijske fotone nego Si. Visoka čistoća potrebna je za potiskivanje parazitske vodljivosti. Preteča HPGe detektora bili su Ge(Li) detektori, gdje Ge kristali nisu bili dovoljno čisti pa se dodavao Li kao donor, kako bi se zasitile (pretežito akceptorske) nečistoće i tako smanjila vodljivost.

Slika 2. Cilindrični HPGe detektor n-tipa. Između p-poluvodiča na vanjskoj i n-poluvodiča na unutarnjoj površini je Ge kristal. V_R osigurava nepropusnu polarizaciju. Mjeri se puls električne struje (I) u vremenu (t).

Najčešća realizacija HPGe detektora prikazana je na Slici 2, gdje je skiciran poprečni presjek cilindričnog HPGe detektora n-tipa. Unutar vrlo čistog monokristalnog Ge cilindra je šupljina, na površini koje je jakim dopiranjem stvoren poluvodič n-tipa, dok je vanjska površina cilindra naglašeno p-tipa. Radi se o verziji p-n spoja gdje je nepropusna polarizacija osnažena umetnutim monokristalnim Ge, kojem je na ~ 80 K električna vodljivost zanemariva. Nepropusna polarizacija spoja osigurana je naponom V_R od tipično nekoliko kV. Vanjska elektroda (p-tip) proizvedena je ionskom implantacijom [4] nekog akceptora, uglavnom bora. Unutarnja elektroda (n-tip) najčešće je načinjena difuzijom litija. Naziv detektora, p-tip

ili n-tip, daje se **prema tipu unutrašnje elektrode**, a ne prema tome je li sam kristal Ge lagano n ili p tipa, što se u praksi može dogoditi. Aktivni prostor nalazi se između p i n područja, koja je stoga poželjno načiniti tankima i lokaliziranima uz površinu; u praksi, implantacija daje sloj debeo svega nekoliko stotina nanometara, a difuzija sloj koji je nešto deblji, ali ipak tanji od milimetra.

Zbog vrlo visoke čistoće Ge monokristala, niske temperature i velikog V_R, između unutrašnje i vanjske površine detektora ne teče gotovo nikakva struja sve dok nema izvana potaknute ionizacije. Dođe li do ionizacije visokoenergijskim fotonom, gibanje elektrona i šupljina pod utjecajem V_R rezultira pulsom struje koji se prikladnom elektronikom, ovdje shematski prikazanom kao mjerni instrument – kružić sa strelicom, mjeri i procesira **direktno**. Broj pretvorbi između različitih oblika energije ovdje je dakle minimalan, tj. iznosi jedan – i odnosi se na energiju fotona uloženu u stvaranje parova elektron-šupljina.

PIPS DETEKTORI NABIJENIH ČESTICA

α i β čestice bivaju apsorbirane u materiji nakon što prođu male udaljenosti, pa se za njihovu detekciju nameću detektori s velikim omjerom upadne površine i aktivnog volumena. Kao pogodna izdvaja se planarna geometrija, a kao prikladan materijal Si, koji se može koristiti na sobnoj temperaturi zbog dovoljnog E_g, a tehnološki preduvjeti riješeni su u okvirima razvijene CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) tehnologije u primjenama planarnog silicija.

Slika 3. Pločica Si (a) pasivizira se narastanjem sloja SiO_2 (b), koji se selektivno odstrani (c), a zatim se implantiraju donor i akceptor (d).

Način proizvodnje PIPS detektora dobro oslikava njegova svojstva kao i razlog za spomenutu kraticu. Kao što je skicirano na Slici 3, površina tanke monokristalne Si pločice (*planar silicon*) termički se oksidira u SiO_2, što pasivizira površinu (*passivated*). Oksidni sloj se selektivno (s nekih dijelova površine, kroz litografski definiranu masku) odstrani jetkanjem, a potom se ionski implantiraju donori i akceptori (*implanted*). Sučeljeni poluvodiči n-tipa i p-tipa stvaraju p-n spoj, te vrijede prije objašnjeni principi detekcije. Napon V_R nepropusne polarizacije je zbog planarnosti strukture relativno mali, tipično 20 – 100 V. Sam p-n spoj je duboko u poluvodiču, što doprinosi mehaničkoj i kemijskoj stabilnosti: površinu detektora moguće je čistiti krpicom i standardnim organskim otapalima, cijeli je sklop detektora kompaktan i robustan, itd. Konačno, debljina područja osiromašenja lako se kontrolira naponom V_R te se može ugađati, što olakšava elektroničku optimizaciju detektora.

ZAKLJUČAK

U kvantitativnoj detekciji, odnosno spektrometriji ionizirajućeg zračenja danas primat preuzimaju HPGe detektori visokoenergijskih fotona i PIPS detektori nabijenih čestica. Oba ta detektora koriste poluvodički p-n spoj pri nepropusnoj polarizaciji, gdje u pojasu osiromašenja visokoenergijske upadne čestice izazivaju pobuđenja u vidu slobodnih, električki vodljivih elektrona i šupljina. Primjena tog jedinstvenog principa razlikuje se za različite ionizirajuće čestice, što je ilustrirano kvalitativnim razmatranjima odabira materijala, geometrije i radne temperature za pojedinu vrstu detektora. Poluvodički detektori se općenito izdvajaju po svojoj praktičnosti, zbog velike osjetljivosti na depoziciju energije izvana i neposredne uklopivosti u elektroničke mjerne uređaje i postave; HPGe i PIPS detektori se među njima izdvajaju po *state of the art* tehnologiji proizvodnje i posljedičnim izvrsnim svojstvima.

LITERATURA

[1] Flakus FN. Detecting and measuring ionizing radiation – a short history. IAEA Bulletin 1981;23:31-26.

[2] Knoll GF. Radiation Detection and Measurement, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1989.

[3] Darken LS, Cox CE. High-Purity Germanium Detectors. U: Schiesinger TE, James RB (Eds.). Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications, Academic Press, San Diego, 1995.

[4] Kittel C. Introduction to Solid State Physics, John Wiley & Sons, New York, 1986.

PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION OF SOME MODERN DETECTORS OF IONISING RADIATION

Dinko Babić
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
dbabic@imi.hr

There is a golden rule in experimental physics: measurements should be carried out by electrical means, which also includes avoiding extra conversions of other forms of energy into electrical energy. Regarding detection of ionising radiation, the above approach has been fully implemented by the use of semiconducting devices. In this review paper, principles of operation of two modern and already common detectors are described. These are HPGe (*High Purity Germanium*) photon detectors and PIPS (*Passivated Implanted Planar Silicon*) detectors of charged particles. Both are based on semiconducting p-n junction under reverse bias, where incoming high-energy particles cause excitations of electrically conducting electrons and holes in the depletion region. Application of this principle is different for different ionising particles, which is illustrated via qualitative considerations of the choice of material, geometry and operation temperature for a given detector. Semiconducting detectors are generally renowned for being practical, since they are highly sensitive to externally deposited energy and also fit directly with electronic measurement devices and setups. Among them, HPGe and PIPS detectors are distinguished because of the state of the art technology of their production and consequent superb properties.

INDIVIDUAL MONITORING AND TL DOSIMETRY IN HUNGARY

Margit Osvay
Institute of Isotopes of the Hungarian Academy of Sciences,
Budapest, Hungary
osvay@iki.kfki.hu

FILM DOSIMETRY

The widespread development and application of X-ray and nuclear energy resulted in the problem of ionizing radiation dosimetry also in Hungary. The individual monitoring started in 1955 using film badge and various "pen type" ionization chambers with different measuring ranges to determine the external photon radiation doses.

Since 1966 the film badge has been accepted as the official personal dosimeter system in Hungary. The film monitors are presently processed bimonthly. The value of customers of whole body dosimeters are given in Table 1.

Table 1. Distribution of dosimeters (97 000/year)

Medicine	54%
Dentist	1%
Industry	9%
Nuclear Industry	31%
Research	2%
Army	2%
Veterinary	0.1%
Other	0.9%

The personal monitoring for about 16 000 occupationally exposed "A category" workers is conducted by the National Research Institute of Radiobiology and Radiohygiene, with Kodak film badge. The calibration of dosimeters is performed in the primary standard laboratory of the National Standardization Laboratory (OMH) according to ISO17025 standard.

The plastic film badge used is provided with metal filters for photon radiation detection and with high and low energy discrimination. The plastic

and open windows in its front side are provided for beta radiation detection. The registration level of the film dose is 0.2 mSv.

The annual doses received by workers in the past 3 years (2007 – 2009) were distributed in the following way:

- 98 % less than 10 mSv / year
- 2 % less than 20 mSv / year.

The external exposures were low, indicating high standards of safety.

THERMOLUMINESCENT DOSIMETRY

The thermoluminescent (TL) method for personal dosimetry purposes was introduced in Hungary in the early 1970's. Central Research Insitute of Physics and Insitute of Isotopes developed together a solid state dosimetry system using first 2 pieces of LiF (TLD-100) TL dosimeters in the same badge together with the film. Later, the Harshaw LiF dosimeters were changed to the Polish LiF (MTS-N) ones, having higher sensitivity to gamma and to mixed neutron-gamma field dosimetry purposes.

At present, besides the national film dosimetry service, there are three TL dosimetry services as well (Atomic Energy Research Institute, Institute of Isotopes, Nuclear Power Plant).

The thermoluminescent (TL) whole body dosimeters are used for individual monitoring parallel with the film and the evaluation of the various types of LiF (TLD-100, Polish MTS-N etc.) is performed at "home" dosimetry services using different manual and automatic TL readers (Harshaw 4000, Harshaw 3500, Alnor TLD reader).

Personal dosimety data measured by film and TL method are regularly compared.

The personal dosimetry of neutron radiation is restricted to Nuclear Power Plant (Paks), Research Reactor of the Atomic Energy Research Institute, Training Reactor of the Technical University and to the 3 small companies. About 300 workers are controlled by solid state track detectors and TL dosimeters. The measurements of $H_p(10)$ are based on TL technique. The TL badge consists of 2 pieces TLD: TLD-100 and TLD-700.

THERMOLUMINESCENT RESEARCH

In addition to the successful applications of various TL dosimeters for work place monitoiring, much effort was devoted to TL research. The selection from our results presented in this report, focuses on the main developments:

1. Al_2O_3:Mg,Y ceramic TL dosimeters for mGy – kGy gamma dosimetry

Al_2O_3:Mg,Y ceramic TL dosimeters were developed at the Institute of Isotopes for accidental and high dose dosimetry purposes (Hungarian Patent) [1]. The thermoluminescent glow curves of LiF(P), TLD-100 and Al_2O_3:Mg,Y dosimeters irradiated with gamma dose of 10 mGy are shown in Figure 1.

Figure 1. Glow curves of TLD-100, LiF(P) and Al_2O_3:Mg,Y ceramic TLDs irradiated with gamma dose of 10 mGy

The application of Al_2O_3:Mg,Y dosimeters was extended to high temperatures too, in order to measure the dose distributions within the hermetic zone of a power reactor, where the gamma doses are in the range of 0.1 Gy to 10 kGy and the temperatures are in the range of 50 – 100 °C.

Most thermoluminescent (TL) dosimeters are not suitable for use in such hostile environments since their signal saturates at high dose; they do not have proper high temperature TL peaks for use at high temperatures.

The new calibration and measuring method has been successfully applied for dose mapping within the hermetic zone of the Paks Nuclear Power Plant even at high temperature parts of the blocks [2].

2. Portable TL reader (PILLE) with bulb dosimeters for space dosimetry

The Atomic Energy Research Institute has developed and manufactured a series of TLD systems for spacecraft, consisting of a set of bulb dosimeters and a small compact TLD reader suitable for an on-board evaluation.

Highly accurate measurements were carried out on the board of the Salyut-6, -7 and Mir Space Station as well as in the Space Shuttle. The Pille reader was used with success for on-board evaluations by the First Hungarian Cosmonaut as well [3-4].

3. Environmental dosimetry using high sensitvity TLDs

A ballon experiment was made at about 38 km height in the stratosphere using our TL dosimeter system (Al_2O_3:C and $CaSO_4$:Tm) with various LET sensitivities [5] (Table 2).

Table 2. Main glow peak temperatures and TL sensitivities to γ and α exposures (normalized to TLD-100)

Dosimeter	**LiF (TLD-100)**	**Al_2O_3:C**	**$CaSO_4$:Tm**
Origin	Harshaw	Russia	Serbia
Peak (^oC)	200	190	240
γ sensitivity	1	120	40
α sensitivity	1	1	10

The large difference of sensitivities of TLD-s to high LET radiation was used to estimate the ratio of low to high LET radiation of stratospheric area.

The cosmic component of environmental radiation close to the sea level is about 30 nGy/h. Our result indicates that the cosmic radiation at 38 km altitude in the stratospheric area is about 100 times higher [6].

4. New TL system and its application for mixed neutron-gamma field dosimetry ($Li_2B_4O_7$ – $Li_2B_4O_7$:Cu)

The thermal neutron sensitivity of the newly developed lithium tetraborate ($Li_2B_4O_7$) single crystal is about 5 times lower, than of TLD-100 one. The scaling of relative thermal neutron sensitivities for the investigated TLDs is summarised in Figure 2.

The great difference of relative neutron sensitivities between the undoped ($Li_2B_4O_7$) and doped lithiumtetraborate ($Li_2B_4O_7$:Cu) single crystal

dosimeters suggests the application of paired LTB ($Li_2B_4O_7$) and LTB:Cu ($Li_2B_4O_7$:Cu) for obtaining information about the neutron dose in a mixed-field [7].

Figure 2. Thermoluminescence glow curves of dosimeters irradiated with mixed field (thermal neutron fluence: 10^{11} n_{th} cm^{-2}; gamma dose: 62 mGy)

REFERENCES

[1] Osvay M, Bíró T. Aluminium Oxide. In: Thermoluminescent Materials. USA: Prentice Hall Inc, 1993.

[2] Osvay M, Deme S. Application of TL dosemeters for dose distribution measurements at high temperatures in nuclear reactors. Radiat Prot Dosim 2006;119:271-275.

[3] Apáthy I, Deme S, Bodnár I, Csőke A, Héjja I. On-board TLD system for dose monitoring on the international space station. Radiat Prot Dosim 1999; 84:321-323.

[4] Deme S, Apáthy I, Héjja I, Láng E, Fehér I. Extra dose due to extravehicular activity during the NASA4 mission measured by an on-board TLD system. Radiat Prot Dosim 1999;85:121-124.

[5] Osvay M, Ranogajec-Komor M. LET dependence of high sensitivity TL dosemeters. Radiat Prot Dosim 1999;84:219-222.

[6] Katona T, Osvay M, Deme S, Kovács S. Environmental dosimetry using high-sensitivity TL detectors, Rad Phys Chem 2007;76:1511-1514.

[7] Fernandes AC, Osvay M, Santos JP, Holovey V, Ignatovych M. TL properties of newly developed lithium tetraborate single crystals. Radiat Meas 2008;43:476-479.

MJERENJE DOZE U OKOLINI S TL I RPL DOZIMETRIMA

Mária Ranogajec-Komor[1], Ildikó Mócsy[2], István Csige[3] i Željka Knežević[1]

[1]Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska
[2]Sapientia University, Cluj-Napoca, Rumunjska
[3]Institute of Nuclear Research, Debrecen, Mađarska
marika@irb.hr

UVOD

Istraživanje opisano u ovom radu bilo je usmjereno na mjerenje integralne doze u okolini. Mjerenja su bila dio rumunjsko-mađarsko-hrvatskog projekta koji je za cilj imao izrađivanje nove metode za pripremanje "radonske karte". Projekt je dobiven u sklopu znanstvenih projekata Mađarske akademije znanosti u 2009.

Naslov cijelog projekta bio je "Modeliranje koncentracije radona u zatvorenim prostorima". Opravdanost takvog projekta potječe iz opažanja da je oboljenje dišnih putova u porastu, a taj porast je u velikoj mjeri uzrokovan:

- zagađivanjem okoline,
- promjenom životnih običaja civilnog društva, tj. sve više vremena provodimo u zatvorenim prostorima. Iako je radon (Rn) svuda, njegova koncentracija povećana je u zatvorenim prostorima.

Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) je na osnovi znanstvenih studija ustanovila da postoje jasne evidencije da radon djeluje kao uzrok raka pluća u sveopćoj populaciji u koncentracijama koje su nađene u uobičajenim domovima [1]. Prema priopćenju Znanstvenog odbora Ujedinjenih naroda za utjecaj atomskog zračenja (UNSCEAR) [2], 85,4 % efektivne godišnje doze populacije Zemlje potječe od prirodnog zračenja, a prema godišnjem izvještaju Državnog sveučilišta Idaho (Idaho State University, ISU) 2008. godine prikazano je da u prosjeku radon uzrokuje 55 % godišnje efektivne doze svake osobe u SAD [3].

Cilj projekta bio je izrada matematičkog modela za računanje koncentracije Rn u zgradama od različitih materijala, na osnovi podataka mjerenih s Alpha gardom na tlu. Rezultati modela uspoređeni su s eksperimentalnim vrijednostima mjerenim detektorima traga CR-39 u zgradama.

Kao dodatak određivanju Rn-a mjerene su doze gama zračenja unutar i izvan zgrade termoluminescentnim (TL) i radiofotoluminescentnim (RPL) dozimetrima koji su opisani u ovom radu. Da bi se pristupilo ovim mjerenjima potrebno je bilo prethodno testirati TL i RPL sustave [4-6] prema međunarodnom standardu [7].

MATERIJAL I METODE

Parametri dozimetrijskih sustava i načina evaluacije prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Parametri svojstva i evaluacije dozimetrijskih sustava

Dozimetar	**TLD**	**TLD**	**TLD**	**TLD**	**RPL**
Oznaka	TLD-700	Al_2O_3	GR-200A	TLD-100H	RPL SC-1
Materijal	^{7}LiF:Mg,Ti	Al_2O_3:C	LiF:Mg,Cu,P		s Ag aktivirano fosfatno staklo
Porijeklo	Harshaw, SAD	Rusija	Kina	Harshaw, SAD	Chiyoda, Japan
Dimenzije (mm)	3.2×3.2×0.9	Φ 5×1	Φ4.5×0.8	3×3×0.5	16×16×1.5
Čitač	Toledo 654				FGD-200
Regeneriranje					
***T* (°C)**	400+100	270	240	240	400
***t* (min)**	60+120	čitanje	10	10	60
Predgrijavanje					
***T* (°C)**	100	100	100	100	70
***t* (min)**	20	20	20	20	60
Čitanje					UV ekscitacija
***T* (°C)**	270	270	220	220	-
***t* (s)**	35	35	30	30	-

Jedan dozimetar na jednoj lokaciji uključuje TL i RPL dozimetre, dok TL dozimetar sadrži 4 detektora prema Tablici 1.

Protokol dozimetrije u okolini opisan je u našem ranijem radu [8].

Korigirana doza gama zračenja (D_{li}) na lokaciji *i* računa se:

$$D_{li} = D_i - D_t + \check{D} \times t_m \qquad (1)$$

gdje su D_i: terenska doza na lokaciji *i*
D_t: izmjerena transport doza
$\check{D}$: brzina doze po danu na mjestu gdje se pohranjuju transportni dozimetri za vrijeme monitoringa
t_m: vrijeme mjerenja (monitoringa) na lokaciji (u danima).

Za ispitivanje radona i gama zračenja izabrana su 2 naselja u Rumunjskoj: Cluj-Napoca (10 lokacija) i Szentlászló (5 lokacija). Na svakoj lokaciji doze su mjerene unutar jedne zgrade i u okolini zgrade, tj. pripremljeno je 30 terenskih dozimetara. Dodatna 4 dozimetra su služila za korekciju doze tijekom transporta te je pripremljeno po 5 kalibracijskih i kontrolnih dozimetara. Kalibracija je izvršena pomoću izvora ^{137}Cs, dozom od 2 mGy (kerma u zraku, K_a). Kalibracijski i kontrolni dozimetri su cijelo vrijeme bili pohranjeni u olovnom tornju s niskim pozadinskim zračenjem. Vrijeme između regeneriranja i očitavanja iznosilo je 127 dana od kojih je 41 dan bilo vrijeme monitoringa na lokaciji. Ostalo vrijeme bilo je potrebno za transport (uključujući carinu, skladištenje itd.).

REZULTATI

Nekorigirane terenske doze na nekoliko lokacija izmjerene različitim dozimetrima prikazane su u Tablici 2. To su doze izmjerene za ukupno vrijeme izlaganja, tj. između regeneriranja i očitavanja (127 dana). Standardne devijacije 5 različitih detektora, dozimetara na svim lokacijama bile su u opsegu 4,4 – 17,7 %.

Tablica 2. Terenske doze na različitim lokacijama izmjerene različitim dozimetrijskim sustavima.

Lokacija	**Terenska doza (D_i) na lokaciji** (mGy)						
	TLD-700	**Al_2O_3**	**GR-200A**	**TLD-100H**	**RPL**	**Sr. vr.** (mGy)	**SD** (%)
1	0,35	0,31	0,32	0,30	0,28	0,31	8,3
2	0,37	0,39	0,37	0,32	0,31	0,35	9,9
...							
29	0,38	0,37	0,34	0,29	0,30	0,34	12,0
30	0,37	0,36	0,34	0,32	0,30	0,34	8,5

Ď vrijednost iz jednadžbe (1) uzeta je kao srednja vrijednost izmjerenih transportnih doza svih dozimetara po danu. Ta aproksimacija bila je potrebna jer u Rumunjskoj nije bilo na raspolaganju mjesto gdje je bila poznata brzina doze zračenja.

Nakon korigiranja terenske doze s transportnim dozama i za 41 dan monitoringa prema jednadžbi (1), zbirni rezultati prikazani su u Tablici 3.

Tablica 3. Korigirane doze gama zračenja (D_{li}) na lokacijama

Naselje **Broj lokacija**		**Doza** (mGy) **Unutar zgrada**	 **Na otvorenom**
Cluj-Napoca	**Sr.vr.** (mGy)	0,16	0,14
1 – 10	**SD** (%)	10,0	8,8
Szentlászló	**Sr.vr.** (mGy)	0,14	0,16
1 – 5	**SD** (%)	6,7	3,5

ZAKLJUČCI

- Slaganje rezultata mjerenja doza u okolini s TL i RPL sustavima je zadovoljavajuće (TL/RPL = 1,01; ± 12,5 %) usprkos relativno kratkog vremena (41 dan) monitoringa, tj. nije nađena sustavna razlika između dva dozimetrijska sustava;
- nije nađena razlika između doze mjerene izvan i unutar zgrade na istoj lokaciji što pokazuje da materijal gradnje ne utječe na pozadinsko gama zračenje u okolini;
- korigirane doze na lokacijama (0,14 – 0,16 mGy) odgovaraju prirodnoj pozadinskoj dozi od gama zračenja za period od 41 dana i pokazuju samo normalno prirodno variranje;
- vrijeme transporta i skladištenja predugo je (86 dana) u usporedbi s periodom monitoringa (41 dan) što može uzrokovati porast slučajne nesigurnosti;
- nedovoljna uvježbanost suradnika koji su radili na lokacijama uzrokuje probleme koji pogoršavaju kvalitetu određivanja vanjske doze (npr. izgubljen 1 dozimetar, zamijenjeno 3 dozimetra, oštećen 1 dozimetar).

Zadnja dva čimbenika u pravilu ne ovise o ljudima koji rade dozimetriju, ali mora ih se uzeti u obzir kod obrade rezultata.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Mađarske akademije znanosti i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH. Autori zahvaljuju Chiyoda Technol Corporation za donaciju RPL dozimetrijskog sustava.

LITERATURA

[1] World Health Organization (WHO). WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. (Eds Zeeb H., Shannoun F.) ISBN 978 92 4 154767 3, Geneva: WHO; 2009.

[2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, United Nations, New York, 2000.

[3] Idaho State University (ISU). Radiation Information Network's: Radiation and US. Annual Report 2008. http://www.physics.isu.edu/radinf/radrus.htm, Pocatello, ID: ISU; 2008.

[4] Ranogajec-Komor M. Thermoluminescence dosimetry – application in environmental dosimetry. Radiation Safety Management 2003;2(1):2-16.

[5] Ranogajec-Komor M. Passive solid state dosimeters in environmental monitoring. In: New techniques for the detection of nuclear and radioactive agents (Ed. Aycick, GA). Dordrecht, The Netherlands; Springer: 2009. Str. 97-112.

[6] Ranogajec-Komor M, Knežević Ž, Miljanić S, Vekić B. Characterisation of radiophotoluminescent dosimeters for environmental monitoring. Radiat Meas 2008;43(2-6):392-396.

[7] International Electrotechnical Committee (IEC). Radiation protection instrumentation – Passive integrating dosimetry systems for environmental and personal monitoring – Part 1: General characteristics and performance requirements. Geneva; CEI/IEC International Standard 62387-1:2007.

[8] Ranogajec-Komor M, Vekić B, Piesch E, Burgkhardt B, Szabó PP. Intercomparison of solid state dosemeters within environmental monitoring. Radiat. Prot. Dosim. 1996;66(1-4):139-144.

ENVIRONMENTAL DOSIMETRY WITH TL AND RPL DOSIMETERS

Mária Ranogajec-Komor[1], Ildikó Mócsy[2], István Csige[3] and Željka Knežević[1]

[1]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
[2]Sapientia University, Cluj-Napoca, Romania
[3]Institute of Nuclear Research, Debrecen, Hungary
marika@irb.hr

Investigation presented in this paper was focused on integral gamma dose measurements in the environment. Study was part of a Romanian-Hungarian-Croatian project to work out a new method for preparing a "radon map".

For gamma radiation dose measurements four different thermoluminescence (TL) detectors (TLD-100H, TLD-700, GR-200A, Al_2O_3:C) and one radiophotoluminescence (RPL) dosimeter (SC-1) were applied.

Monitoring was carried out at the 15 locations within two settlements in Romania. At all locations dosimeters were placed inside and outside of the building. The mean value of gamma radiation dose at all locations within and outside the buildings was 0.24 mGy, ± 8 %.

From the results of this study the following can be concluded:

- Results obtained by TL and RPL dosimeters did not show systematic difference.
- There was no difference (larger than the measurement uncertainty) in the dose values at the 15 locations. The standard deviation of 9 % satisfies the requirements of the international standard CEI/IEC 62387-1:2007.
- There was no difference between the doses measured inside and outside the buildings, i.e. the building materials did not influenced the background doses.
- The measured dose values (0.14 – 0.16 mGy) correspond to the natural integral background in the environment for the monitoring period (41 days).

KALIBRACIJA TLD IRADIJATORA PREMA SEKUNDARDNOM STANDARDU ZA K_{air}

Marija Surić Mihić[1], Dario Posedel[2], Jerko Šiško[1], Tomislav Meštrović[1] i Ivica Prlić[1]
[1]Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
[2]Ekoteh dozimetrija d.o.o., Zagreb
msuric@imi.hr

UVOD

Pri provedbi osobnog dozimetrijskog nadzora određivanjem osobnog doznog ekvivalenta $H_p(10)$, korištenjem sustava za termoluminiscentnu (TL) dozimetriju, nužno je provoditi redovite mjere osiguranja kvalitete rada sustava. Te mjere, između ostalih, uključuju relativnu kalibraciju termoluminiscentnih dozimetara (TLD), praćenje stabilnosti korekcijskih faktora elemenata TL dozimetara, ispitivanje stabilnosti TLD čitača, apsolutnu kalibraciju TLD čitača [1].

U Jedinici za dozimetriju zračenja i radiobiologiju Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) te u Laboratoriju za osobnu dozimetriju, Ekoteh dozimetrije d.o.o. (Ekoteh) koristi se sustav za TL dozimetriju koji se sastoji od čitača TL dozimetara, različitih tipova TL dozimetara, iradijatora TL dozimetara (sve proizvođača Panasonic) i računala.

Čitač TL dozimetara je uređaj na čiji ispravan rad mogu znatno utjecati parametri kao što su nečistoće (prašina), kondenzati, stabilnost elektroničkih sklopova za upravljanje i slično. Stoga je nužno provoditi redovito ispitivanje stabilnosti TLD čitača kojim se određuje eventualno odstupanje od posljednje apsolutne kalibracije uređaja. Taj postupak se provodi neposredno prije (a ponekad i tijekom) redovnog mjesečnog očitavanja TL dozimetara za određivanje $H_p(10)$ osoba profesionalno izloženih ionizirajućem zračenju, nakon svakog rada na TLD čitaču kojim je bilo moguće utjecati na njegov rad (redovni ili izvanredni servisi, čišćenje), prije očitavanja dozimetara u postupku međulaboratorijskih usporedbenih ispitivanja i slično. Za provedbu postupka ispitivanja stabilnosti koriste se isključivo tzv. referentni dozimetri ozračeni poznatom dozom zračenja. To su dozimetri s 4 elementa s ugrađenim različitim filtracijama, po dva $^{n}Li_2B_4O_7$ i dva $CaSO_4$, a karakterizira ih najveća ponovljivost (najmanji

relativni koeficijent varijacije srednje vrijednosti) očitane doze na drugom elementu TL dozimetra.

Pri svakom postupku ispitivanja stabilnosti TLD čitača, relativne kalibracije TLD-ova, testiranju rada sustava i sl. uvijek je potrebno posjedovati određenu količinu ozračenih dozimetara korištenjem kojih će se željeni postupak provesti. Ti dozimetri moraju biti ozračeni poznatom dozom, a kako se takvi postupci provode u različitim vremenskim intervalima, posjedovanje uređaja za ozračivanje znatno olakšava rad dozimetrijskog laboratorija u smislu uštede vremena i financijskih sredstava.

U laboratorijima za osobnu dozimetriju IMI i Ekoteh koristimo Panasonic Irradiator UD-794 s izotopom ^{137}Cs nominalne aktivnosti 74 GBq za automatsko ozračivanje dozimetara.

MATERIJALI I METODE

TLD iradijator s izvorom ^{137}Cs nije moguće, zbog neispunjavanja normiranih referentnih uvjeta [2], umjeriti u jedinicama osobnog doznog ekvivalenta te se kalibracija svodi na određivanje doze kojom ozračujemo referentne TL dozimetre u cilju dobivanja očitanja na TLD čitaču iste vrijednosti kao od serije dozimetara ozračenih u sekundarnom standardnom dozimetrijskom laboratoriju (SSDL). Na taj način je omogućeno korištenje TLD iradijatora kao laboratorijskog standarda za ozračivanje koji se može s velikom pouzdanošću koristiti kako za rutinska ozračivanja pri relativnoj kalibraciji dozimetara tako i za ozračivanje referentnih dozimetara pri ispitivanju stabilnosti sustava.

Postupak kalibracije iradijatora za ozračivanje TL dozimetara provodi se neposredno po provedenoj apsolutnoj kalibraciji čitača TL dozimetara. Ozračivanje dozimetara provodi se u akreditiranom umjernom laboratoriju koji može dokazati sljedivost prema primarnom standardu za kermu u zraku K_{air}. Intervali apsolutne kalibracije TLD čitača propisani su, prema zahtjevima norme [3], unutar akreditirane metode za određivanje osobnog doznog ekvivalenta $H_p(10)$. Najmanje 1 grupa od 10 dozimetara po TLD čitaču ozrači se na fantomu [2] dozom od 3,63 mSv iz izvora ^{137}Cs te se nakon 24 h očitava na TLD čitaču. U Jedinici za dozimetriju zračenja i radiobiologiju IMI koriste se 2 grupe po 10 ozračenih dozimetara pomoću kojih se provodi apsolutna kalibraciju čitača nakon koje slijedi kalibracija TLD iradijatora, a u Laboratoriju za osobnu dozimetriju Ekoteh koriste se po jedna grupa od 10 ozračenih dozimetara po TLD čitaču pomoću kojih se provodi kalibracija TLD iradijatora. Razlike u protokolu su posljedica razlika načina rada laboratorija definiranih u vlastitim metodama za

provedbu osobnog dozimetrijskog nadzora ova dva stručna tehnička servisa za poslove zaštite od ionizirajućeg zračenja.

Iste serije od po 10 referentnih dozimetara (od oba tehnička servisa) se sada ozračuju proizvoljnom vrijednosti doze zračenja $D_{iradijator}$ na iradijatoru te se isti dozimetri nakon 24 h očitavaju na TLD čitačima. Dobiveni rezultat je neka doza $H_p(10)$ dodijeljena iradijatorom uz zadanu dozu $D_{iradijator}$. Korekcijski faktor iradijatora k za pojedini element dozimetra određuje se prema sljedećoj jednadžbi:

$$k = \frac{\left(\frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} ECF_i \cdot E_i\right)_{SSDL}}{\left(\frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} ECF_i \cdot E_i\right)_{iradijator}} \qquad (1)$$

U jednadžbi (1) brojnik predstavlja srednju vrijednost korigiranih očitanja grupe referentnih dozimetara ozračenih u SSDL-u, a nazivnik srednju vrijednost korigiranih očitanja iste grupe ozračene proizvoljnom dozom zračenja na TLD iradijatoru. Pri tome je potrebno naglasiti da se korekcijski faktori iz jednadžbe (1) odnose na očitanja na prvom i drugom elementu TL dozimetra ($^{n}Li_2BO_4$). Iako ta dva elementa imaju različitu filtraciju moguće je koristiti srednju vrijednost svih korekcijskih faktora (prvog i drugog elementa) za 3 neovisna TLD čitača iz oba dozimetrijska laboratorija jer na energiji ^{137}Cs pokazuju istu vrijednost omjera izmjerene i stvarne doze [4]. Posebno se izračunava srednja vrijednost korekcijskih faktora za elemente s $CaSO_4$, ali se ne koristi za kalibraciju iradijatora.

Srednja vrijednost korekcijskog faktora za $^{n}Li_2BO_4$ ručno se upisuje u računalni program [6] koji upravlja TLD iradijatorom zajedno s datumom unošenja korekcije. Program automatski korigira vrijeme ozračivanja da bi se dobila željena doza uzimajući u obzir vrijeme poluraspada ^{137}Cs.

REZULTATI

Od uvođenja termoluminiscentne dozimetrije u oba dozimetrijska laboratorija kalibracija TLD iradijatora je provedena dva puta, u razmaku od pola godine. Dobiveni korekcijski faktori prikazani su u Tablici 1. Prva kalibracija provedena je unošenjem korekcijske vrijednosti k_I = 1/1,076 = 0,93 u računalni program koji upravlja radom iradijatora. Ponovljenim ozračivanjem istih skupina dozimetara provjerena je ispravnost kalibracije.

Srednja vrijednost očitanja $H_p(10)$ na drugom elementu pokazivala je odstupanje manje od 1 % u odnosu na srednju vrijednost $H_p(10)$ očitanu za istu grupu dozimetara ozračenih u SSDL-u.

Tablica 1. Rezultati izračuna korekcijskog faktora za TLD iradijator

	$\bar{k}_{^nLi_2BO_4}$
1. kalibracija	1,0760
2. kalibracija	0,9995

Prilikom provedbe druge kalibracije TLD iradijatora izračunata je srednja vrijednost korekcijskog faktora za $^nLi_2BO_4$ iz očitanja oba dozimetrijska laboratorija koja je iznosila 0,9995. Zbog iznosa faktora jako bliskog 1 odlučeno je da se korekcijska vrijednost neće unositi u računalni program. U cilju provjere, ponovo su na iradijatoru ozračene iste grupe dozimetara korištene za kalibraciju. Izračunata je srednja vrijednost očitanja $H_p(10)$ na drugom elementu koja je pokazivala odstupanje unutar 1,5 % u odnosu na srednju vrijednost $H_p(10)$ očitanu za istu grupu dozimetara ozračenih u SSDL-u.

ZAKLJUČAK

U postupku osiguranja kvalitete dozimetrijskog laboratorija mogućnost ozračivanja dozimetara za potrebe ispitivanja stabilnosti sustava, relativne kalibracije dozimetara, različita ispitivanja karakteristika čitača i dozimetara te općenito kontrole kvalitete rada, nameće se kao nužnost koja znatno olakšava efikasnost rada. Pri tome posjedovanje vlastitog, uvijek dostupnog uređaja za automatsko ozračivanje dozimetara, a koji je pri tome moguće umjeriti da služi i kao standard laboratorija, osigurava velike uštede ljudskih i financijskih sredstava.

Kalibracija TLD iradijatora, koji predstavlja značajan dio sustava za termoluminiscentnu dozimetriju, omogućuje laboratoriju ozračivanje dozimetara poznatom ili pouzdanom dozom čime dozimetrijski laboratorij može jednostavnije zadovoljiti sve zahtjeve norme [3] s obzirom na proces osiguranja kvalitete svog rada.

Rezultati provjere kalibracije TLD iradijatora potvrdili su da je kalibracija unošenjem korekcijskog faktora provedena ispravno i da se TLD iradijator može koristiti kao pouzdani uređaj za ozračivanje dozimetara.

LITERATURA

[1] User's Manual for the Panasonic UD-706 and UD-716 TLD Readers. Secaucus, New Jersey: Panasonic Industrial Company Two Panasonic Way; 1993.

[2] ISO 4037-1:1996 - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods. Geneve: International Organization for Standardization; 1996.

[3] HR EN ISO/IEC 17025:2007 Opći zahtjevi za osposobljenost ispitnih i umjernih laboratorija. Zagreb: Hrvatski zavod za norme; 2007.

[4] Nichols C. Dose Calculation Method for Panasonic UD-802AT Dosimeter in UD-854AT Holder. Panasonic Industrial Europe (UK); 1998.

[5] International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: IAEA; 1996.

[6] Panasonic UD – 794C TLD IRRADIATOR Operation Manual, Operation Manual Version 6.22. Matsushita Industrial Equipment Corporation of America; 2001.

TLD IRRADIATOR CALIBRATION TO A K_{air} SECONDARY STANDARD

Marija Surić Mihić[1], Dario Posedel[2], Jerko Šiško[1], Tomislav Meštrović[1] and Ivica Prlić[1]
[1]Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
[2]Ekoteh Dosimetry Radiation Protection Co., Zagreb, Croatia
msuric@imi.hr

Quality assurance programme of a personal dosimetry system using termoluminiscent dosimeters (TLD) requires regular stability checks of the TL dosimetry system.

Irradiation of TLDs in a Secondary Standard Dosimetry Laboratory (SSDL) in intervals prescribed in the accredited measurement method as a part of the process of TLD reader's calibration is often not frequent enough to fulfil requirements on accuracy and stability of the TL dosimetry system.

Accuracy of TLD reader's work is affected by dust, condensates, electronic components stabilities, etc. It is necessary to perform TLD system stability checks prior to regular monthly personal dosimetry in order to detect any deviation from the previous absolute calibration of the TLD reader and perform corrections. Irradiation of dosimeters in SSDL, which is needed monthly or more often, is hardly feasible taking into account engagement of human and financial resources of the dosimetry laboratory. Therefore a TLD irradiator to perform routine irradiations of TL dosimeters is used. The TLD irradiator using ^{137}Cs radioactive source could not be calibrated, due to requirements given by ISO 4037-1:1996, in personal dose equivalent units.

Calibration of the TLD irradiator is based on determination of an average dose, ascribed by the irradiator to the group of the dosimeters. It is equal to the average dose red on the TLD reader on the same group of the TLDs irradiated in SSDL.

It enables TLD irradiator to be used as a highly reliable laboratory standard for routine irradiations in relative calibrations of TL dosimeters as well as in regular system stability checks.

KONTROLER VREMENA OZRAČIVANJA DETEKORA NUKLEARNIH TRAGOVA

Vanja Radolić[1], Darijo Čamilović[2] i Denis Stanić[1]
[1]Odjel za fiziku Sveučilišta u Osijeku, Osijek
[2]OŠ "Ivan Lacković Croata", Kalinovac
vanja@fizika.unios.hr

UVOD

Priča o detektorima nuklearnih tragova u znanosti započinje 1958. godine kada je D. A. Young otkrio prve tragove u kristalu LiF-a koji je bio u kontaktu s uranijevom folijom [1]. Time je pokrenut proces kasnije široke primjene različitih materijala (plastika, staklo, minerali) u detekciji ionizirajućeg zračenja. Metoda mjerenja radona detektorima nuklearnih tragova jedna je od najraširenijih metoda za integralno mjerenje koncentracije aktivnosti radona kako u zraku tako i u tlu. Pogodna je za terenski rad jer su detektori lagani, jeftini i ne zahtijevaju kontrolu rada za vrijeme mjerenja, koje može trajati od nekoliko tjedana pa sve do 1 godine. Detektori su neosjetljivi na vlažnost zraka, niske i visoke temperature u okolišu, svjetlost, ne zahtijevaju energiju za rad, a detekcijske karakteristike ovise o svojstvima samog materijala od kojeg su načinjeni. Najpoznatiji detektori nuklearnih tragova su filmovi od celuloznog nitrata (LR-115, CN-85; proizvođač Kodak-Pathé, Francuska), polikarbonata (Makrofol i Lexan) te alildiglikol polikarbonata (CR-39) [2].

Na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku zadnjih dvadesetak godina sustavno se istražuje primjena detektora nuklearnih tragova LR-115 II u mjerenju koncentracije radona u zraku, tlu i vodi. Tijekom tog vremena razvijeno je nekoliko radonskih detektora [3-5] pa se pokazala potreba za uređajem koji bi kontrolirao vrijeme ozračivanja detektora s ciljem proučavanja određenih svojstava detektora nuklearnih tragova: ovisnosti koeficijenta osjetljivosti detektora nuklearnih tragova kako o uvjetima kemijske obrade (jetkanja) detektora tako i o energijama upadnih čestica odnosno kutovima upada, zasićenje brojača iskri pri velikim gustoćama tragova na odvojivim LR-115 II detektorima nuklearnih tragova.

MATERIJALI I METODE

Zbog potrebe preciznog mjerenja vremena ozračivanja detektora izrađen je uređaj KVOD – kontroler vremena ozračivanja detektora nuklearnih tragova. Za izradu pokretnog mehanizma iskoristili smo dijelove dvaju optičkih uređaja: CD ili DVD čitač/snimač. Jedan optički uređaj služi kao nosač detektora (vertikalno gibanje) i njime se određuje udaljenost između izvora zračenja i detektora. Drugi uređaj služi za pomicanje zaštitne pločice (horizontalno gibanje) čime se započinje/prekida ozračivanje detektora. Elektromotor je pogonski dio sklopa i njime se upravlja pomoću računala i upravljačke elektronike koristeći paralelni port (LPT port) za komunikaciju. Za izradu upravljačke elektronike KVOD-a dovoljna su dva otpornika od 1 kΩ, dva tranzistora BC107 (ili bilo koji zamjenski) i dva releja, kako je prikazano na shemi (Slika 1).

Slika 1. Shema upravljačke elektronike KVOD uređaja

Napajanje potrebno za rad elektromotora odredili smo eksperimentalno spajanjem elektromotora na stabilizirani izvor napajanja i iznosi 5 V. Otpornici su spojeni na bazu tranzistora, a njihova vrijednost od 1 kΩ dovoljna je da zaštiti tranzistore od pregaranja. Tranzistor se uključuje dovođenjem napona na bazu preko paralelnog porta. Kada tranzistor provede struju, on aktivira relej spojen na njegov kolektor. Uloga releja u ovom sklopu je da mijenja polaritet elektromotora, a time i smjer njegove vrtnje. Na taj

način, aktivirajući gornji ili donji tranzistor, zaštitnu pločicu možemo pomicati naprijed-nazad čime otvaramo, odnosno zatvaramo izvor zračenja.

Slika 2. Unutrašnjost KVOD uređaja.

Radioaktivni izvor je niz žica od americija (^{241}Am) površine 6×6 mm^2 koji se nalazi na olovnim pločama debljine 20 mm i pokriven je poklopcem od olovnih ploča debljine 12 mm. Ovakva zaštita dovoljna je da radioaktivno zračenje bude svedeno na mjeru u kojoj je bezopasno za ljudski organizam. Zaštitna pločica je plastična traka debljine 3 mm koja je zalijepljena jednokomponentnim ljepilom na pomični dio optičkog uređaja. Ova debljina je dovoljna da spriječi prolazak α-čestica kroz zaštitnu pločicu. Nosač detektora omogućava definiranje udaljenosti između detektora i radioaktivnog izvora na način da se upadne α-čestice mogu detektirati. Najmanja udaljenost iznosi 1,15 cm, a najveća do 5,5 cm. Cijeli uređaj smješten je u drveno kućište dimenzija $30 \times 20 \times 20$ cm^3, a na njemu se nalazi sučelje za mrežno napajanje te vezu s LPT portom računala.

Rad uređaja možemo opisati na sljedeći način. Uređaj se spaja na računalo i gradsku mrežu pomoću kablova. Izvor zračenja prekriven je zaštitnom pločicom. Na nosač detektora stavlja se detektor i pri tome se vodi računa da bude centriran iznad radioaktivnog izvora. Računalni program pisan u QBasic-u omogućava definiranje i kontrolu vremena

ozračivanja. Motor pomiče zaštitnu pločicu s radioaktivnog izvora i počinje ozračivanje detektora. Nakon proteka zadanog vremena, motor vraća zaštitnu pločicu iznad radioaktivnog izvora čime se sprječava daljnje ozračivanje detektora.

Funkcionalnost KVOD uređaja provjerena je ozračivanjem 16 detektora nuklearnih tragova LR-115 II: 7 ih je ozračeno na udaljenosti 1,5 cm od radioaktivnog izvora u vremenima od 10, 20, 30, …, 70 s, a 9 ih je postavljeno 2 cm od izvora s vremenima ozračivanja 10, 20, … 90 s. Nakon ozračivanja detektori su kemijski obrađeni (jetkani) u 10 % vodenoj otopini NaOH pri temperaturi od 60 °C (333 K) u trajanju od 120 minuta. Površina detektora je snimljena digitalnom kamerom Olympus C-5050 spojenom na optički mikroskop Olympus BX51 uz povećanje od 40×. Svaka snimljena fotografija predstavlja jedno polje detektora površine od 8,682 mm^2. Površina je određena kalibracijom kamere pomoću odgovarajuće programske podrške ili računalnog programa (Quick Photo Pro 1.2). Brojanje tragova na detektorima obavljeno je pomoću programskog paketa Image-Pro Plus 6.0.

REZULTATI

Dobiveni rezultati su prikazani na Slici 3 na kojoj je grafički prikazana ovisnost broja tragova na površini filma (*n*) o vremenu ozračivanja (*t*) detektora LR-115 II. Iz dobivenih se rezultata može pretpostaviti da među promatranim veličinama postoji jasna linearna korelacija (koeficijenti korelacije između eksperimentalnih veličina i pravca regresije iznose r_{2cm} = 0,992 za detektore udaljene 2 cm od radioaktivnog izvora odnosno $r_{1,5cm}$ = 0,974 za detektore udaljene 1,5 cm) što je i potvrdio odgovarajući statistički t-test na razini signifikantnosti od 5 % ($t = 20,473 > t_{0,05} = 1,895$ za 7 stupnjeva slobode, odnosno $t = 9,554 > t_{0,05} = 2,015$ za 5 stupnjeva slobode).

Nadalje, prosječna gustoća tragova na detektorima LR-115 tip II udaljenim 1,5 cm od radioaktivnog izvora ^{241}Am iznosi (304 ± 38) tr cm^{-2} s^{-1} dok na detektorima udaljenim 2 cm ona iznosi (157,4 ± 9,5) tr cm^{-2} s^{-1}. Dakle, svake sekunde tristotinjak α-čestica ostavi trag na detektorskoj površini od cm^2 udaljenoj 1,5 cm od radioaktivnog izvora. Pomicanjem detektora za svega 0,5 cm (na 2 cm od radioaktivnog izvora) broj detektiranih α-čestica se gotovo prepolovljuje.

Slika 3. Grafički prikaz ovisnosti broja tragova po površini filma (n/tr cm^{-2}) u ovisnosti o vremenu ozračivanja (t/s) detektora LR-115 II.

ZAKLJUČAK

KVOD uređajem se mogu ozračivati detektori na udaljenostima od 1,2 do 5,5 cm i u proizvoljnom vremenu, no ne manjem od 0,2 s. Kvadratični oblik radioaktivnog izvora ^{241}Am daje dobro definirani tok α-čestica koji će poslužiti za daljnje istraživanje svojstava detektora nuklearnih tragova.

LITERATURA

[1] Nikezić D, Yu KN. Formation and growth of tracks in nuclear track materials. Materials Science and Engineering R 2004;46:51-123.

[2] Durrani SA. Alpha-particle Etched Track Detectors. U: Durrani SA, Ilić R, ur. Radon measurements by etched track detectors, World Scientific, Singapore, 1997. str. 77-101.

[3] Planinić J, Radolić V, Faj Z, Šuveljak B. Radon equilibrium factor and aerosols. Nuclear Instruments and Methods in Phys Res A 1997;396:414-417.

[4] Planinić J, Radolić V, Čulo D. Searching for an earthquake precursor: Temporal variations of radon in soil and water. Fizika A 2000;9(2):75-82.

[5] Radolić V, Vuković B, Stanić D, Katić M, Faj Z, Šuveljak B, Lukačević I, Faj D, Lukić M, Planinić J. National survey of indoor radon levels in Croatia. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 2006;269:87-90.

TIME CONTROLLER FOR NUCLEAR TRACK ETCHED DETECTORS IRRADIATION

Vanja Radolić[1], Darijo Čamilović[2] and Denis Stanić[1]
[1]Physics Department, Josip Juraj Strossmayer University in Osijek, Osijek
[2]Elementary School "Ivan Lacković Croata", Kalinovac, Croatia
vanja@fizika.unios.hr

Solid state nuclear track detectors are widely used for the detection of heavy charged particles (mostly α-particles) and their operation is based on extensive ionization of the material when these particles pass through a medium. The concentration of the measured radionuclide is proportional to track density on detector film with the so-called coefficient of sensitivity as the proportionality coefficient. Its value generally depends on etching conditions and the proper choice of etching parameters could define an energy range for detection of α-particles which obviously enables recognition of a measured radionuclide. For the investigation of different characteristics of track etched detectors it is very important to irradiate them with constant flux and in controlled conditions. So, the time controller for irradiation of nuclear track detectors is constructed. Working principle is discussed by explaining electronical and mechanical components used inside. Functionality of the device has been tested by exposing the LR-115 type II track etched detectors at two different distances from ^{241}Am radioactive source (1.5 and 2 cm) and during different times of irradiations (10, 20, …, 90 s). The obtained results show that there is a statistically significant linear relationship between the number of tracks on detector and time of irradiations. The average track densities on LR-115 II detectors placed 1.5 cm and 2 cm away from radioactive source were (304 ± 38) tr cm^{-2} s^{-1} and (157,4 ± 9,5) tr cm^{-2} s^{-1}, respectively. To conclude, the flux of α-particles from the radioactive source is well defined and the detector response on time of irradiation is linear. The constructed time controller for nuclear track detectors irradiation will be helpful for further investigation of some particular characteristics of track etched detectors.

ZASIĆENJE BROJAČA ISKRI PRI VELIKIM GUSTOĆAMA TRAGOVA NA DETEKTORIMA NUKLEARNIH TRAGOVA LR-115 II

Vanja Radolić[1], Ivan Stanić[2], Igor Miklavčić[1] i Denis Stanić[1]
[1]Odjel za fiziku Sveučilišta u Osijeku, Osijek
[2]OŠ "Darda", Darda
vanja@fizika.unios.hr

UVOD

Metoda mjerenja radona detektorima nuklearnih tragova jedna je od najraširenijih metoda za integralno mjerenje koncentracije aktivnosti radona kako u zraku tako i u tlu. Pogodna je za terenski rad jer su detektori lagani, jeftini i ne zahtijevaju kontrolu rada za vrijeme mjerenja, koje može trajati od nekoliko tjedana pa sve do 1 godine. Detektori su neosjetljivi na vlažnost zraka, niske i visoke temperature u okolišu, svjetlost, ne zahtijevaju energiju za rad, a detekcijske karakteristike ovise o svojstvima samog materijala od kojeg su načinjeni. Najpoznatiji detektori nuklearnih tragova su filmovi od celuloznog nitrata (LR-115, CN-85; proizvođač Kodak-Pathé, Francuska), polikarbonata (Makrofol i Lexan) te alildiglikol polikarbonata (CR-39) [1].

Penetracijom teških nabijenih čestica (od protona naviše, jer je za stvaranje traga na filmu detektora potrebna viša energija pa su detektori neosjetljivi na β-čestice i γ-zračenje) kroz osjetljivi film detektora dolazi do cijepanja polimernih lanaca filma. Tako npr., α-čestica energije 6 MeV-a stvara oko 150 000 ionskih parova u celuloznom nitratu, a budući da je domet α-čestice u tom materijalu i pri toj energiji negdje oko 40 μm, po jednom nanometru stvaraju se 3 do 4 ionska para [2]. Taj ionizacijski proces otvara i seriju novih kemijskih procesa, koji stvaraju slobodne kemijske radikale nazvane latentni tragovi. Oni su relativno stabilni pri normalnim temperaturama, a stabilnost ovisi o vrsti dielektričnog materijala filma kao i o jakosti ionizacije. Ova prikrivena oštećenja na filmu su promjera od nekoliko desetaka nm i vidljiva su samo elektronskim mikroskopom. Nakon izlaganja filmovi se kemijski obrađuju, odnosno jetkaju, u prikladnoj lužnatoj (NaOH, KOH) ili kiseloj otopini (HF, HNO_3) pri stalnoj temperaturi. Jetkanjem se prekinuti polimerni lanci otapaju i na taj način se mala oštećenja proširuju za faktor $10^2 – 10^3$ te nastaju tragovi vidljivi optičkim mikroskopom. Ovim postupkom novonastali tragovi se i fiksiraju čime

postaju neosjetljivi na promjene temperature te tako trajno ostaju na površini detektora.

Na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku zadnjih dvadesetak godina sustavno se istražuje primjena detektora nuklearnih tragova LR-115 II u mjerenju koncentracije radona u zraku, tlu i vodi. Tijekom tog vremena razvijeno je nekoliko radonskih detektora [3-5] kao i uređaj za vremenski kontrolirano ozračivanje detektora nuklearnih tragova (KVOD) [6]. Pritom se koriste dvije vrste detektora nuklearnih tragova LR-115 II: tzv. neodvojivi (engl. *non-strippable*) na kojima se tragovi broje optičkim mikroskopom (vizualno ili računalno) te odvojivi (engl. *strippable*) na kojima se tragovi broje brojačem iskri (engl. *spark counter*). Zbog samog fizikalnog principa rada brojača (vidi sljedeće poglavlje), nužno se nameće pitanje postoji li neka granična gustoća tragova na filmu kod koje dolazi do zasićenja na brojaču te ovaj prikazuje manji broj tragova od stvarnog. Cilj ovog rada je određivanje takvog praga zasićenja za korišteni brojač iskri te komentiranje dobivene vrijednosti u kontekstu upotrebe odvojivih LR-115 II filmova u radonskom detektoru razvijenom i korištenom na Odjelu za fiziku.

MATERIJALI I METODE

Za brojanje tragova na odvojivim LR-115 II filmovima koristi se brojač iskri AIST-2V (proizvođač: V.G. Khlopkin Radium Institute, St. Petersburg, Rusija). Površina filma koja se broji je fiksna i iznosi 1,06 cm^2. Film se stavlja u nosač koji ima ulogu jedne od ploča kondenzatora dok je druga aluminijska folija iznad filma. Na taj se način film koristi kao dielektrik u kondenzatoru. Primjenom električnog polja nastaje iskra, dolazi do disipacije energije koja pritom zagrije mali dio aluminijske trake dovodeći do lokalne sublimacije aluminija (Slika 1).

Slika 1. Tragovi na aluminijskoj foliji nastali lokalnom sublimacijom; preuzeto iz [7]

Ona onemogućava višestruko brojanje istog traga (jer dolazi do lokalne električne izolacije na mjestu nedostatka aluminija na aluminijskoj traci), no u isto vrijeme može uzrokovati efekt koji se naziva saturacija. Naime, ako su dva traga međusobno udaljena manje nego što iznosi promjer sublimiranog područja (~150 – 200 μm) [7], tada brojač tragova "broji" jedan, a ne dva traga (Slika 2). Što je gustoća tragova veća, to je veća i vjerojatnost gubitka tragova pri njihovom brojanju; efekt saturacije postaje dominantan izvor pogreške metode mjerenja pri većim gustoćama tragova.

Slika 2. Efekt saturacije; s lijeve su strane prikazana mjesta sublimiranog aluminija na odvojivom filmu LR-115-II nakon brojanja, a na desnoj su strani označeni neprebrojeni tragovi (preuzeto iz [8]).

Ispitivanje saturacije tragova na odvojivim filmovima LR-115-II koja uzrokuje pogrešku u brojanju tragova brojačem iskri AIST-2V provedeno je ozračivanjem filmova pomoću KVOD uređaja. Detektori su ozračivani na udaljenosti 2 cm od radioaktivnog izvora (^{241}Am) i to u vremenskim intervalima od 5 s, počevši od 5 s pa do 100 s ozračivanja. Nakon ozračivanja, detektori su kemijski obrađeni (jetkani) u 10 % vodenoj otopini NaOH na temperaturi 50 °C i u trajanju od 180 minuta.

REZULTATI

Dobiveni rezultati ozračivanja detektora su prikazani na Slici 3. Vidi se da nakon početnog linearnog odziva detektora (do ~6000 tr cm^{-2}) s daljnjim povećanjem vremena ozračivanja (pa time i povećanja broja tragova na detektorima) dolazi do brojanja manjeg broja tragova od očekivanog. Očekivani broj tragova je određen prilagodbom prvih pet točaka sa Slike 3, a uz pretpostavku o konstantnom toku α-čestica s izvora [6]. Koeficijent smjera dobivenog pravca regresije iznosi (206,9 ± 5,4) i predstavlja prosječan broj tragova na filmu detektora u jedinici vremena (1 s) ozračivanja; svake sekunde, α-čestice iz radioaktivnog izvora u KVOD

uređaju udaljenom 2 cm od detektora, prosječno na njemu prouzroče 206,9 tragova. Izračunali smo očekivani broj tragova (n` / tr cm^{-2}) na svim ozračenim filmovima i to smo usporedili sa stvarno izbrojanim tragovima na brojaču iskri na način da smo od očekivanog broja tragova oduzeli stvarno izbrojane tragove. Odnos ove dobivene razlike tragova prema stvarno izbrojanim tragovima je prikazan na Slici 4.

Slika 3. Ovisnost izbrojanih tragova na ozračenim odvojivim filmovima LR-115 II o vremenu ozračivanja. Pravac prikazuje očekivani broj tragova s obzirom na konstantni tok α-čestica.

Slika 4. Odnos razlike broja očekivanih i stvarno izbrojanih tragova, (n`-n / tr cm^{-2}), prema stvarno izbrojanim tragovima, (n / tr cm^{-2}). Prikazani pravac regresije definira prag zasićenja na brojaču iskri.

Za empirijske parove (n`-n) i n sa Slike 4, koeficijent korelacije *r* ima vrijednost 0,947, a statistički t-test je pokazao da među njima postoji značajna linearna korelacija na razini signifikantnosti od 5 % ($t = 10,605 > t_{0,05} = 1,771$ za 13 stupnjeva slobode). Dobiveni pravac regresije može poslužiti i kao model za korekciju stvarnog broja tragova na detektorima pri očitanim vrijednostima većim od praga zasićenja koji iznosi 6000 tr cm^{-2}. Ova vrijednost praga zasićenja nam omogućava bolju procjenu pouzdanosti radonskog detektora koji se koristi na Odjelu za fiziku. Naime, gustoća tragova od 6000 tr cm^{-2} odgovara radonskoj koncentraciji od 731 Bq m^{-3} (uz koeficijent osjetljivosti od 44,5 Bq m^{-3} / tr cm^{-2} d^{-1} i uobičajeno jednogodišnje izlaganje). Ta vrijednost je i gornja granica koju korišteni detektori mogu mjeriti (u jednogodišnjem režimu izlaganja) bez korekcije rezultata i oko 10 puta je veća od prosječne vrijednosti radona u kućama u RH.

LITERATURA

[1] Durrani SA. Alpha-particle Etched Track Detectors. U: Durrani SA, Ilić R, ur. Radon measurements by etched track detectors, World Scientific, Singapore, 1997. str. 77-101.

[2] Nikezić D, Yu KN. Formation and growth of tracks in nuclear track materials. Materials Science and Engineering R 2004;46:51-123.

[3] Planinić J, Radolić V, Faj Z, Šuveljak B. Radon equilibrium factor and aerosols. Nuclear Instruments & Methods in Phys Res A 1997;396:414-417.

[4] Planinić J, Radolić V, Čulo D. Searching for an earthquake precursor: Temporal variations of radon in soil and water. Fizika A 2000;9(2):75-82.

[5] Radolić V, Vuković B, Stanić D, Katić M, Faj Z, Šuveljak B, Lukačević I, Faj D, Lukić M, Planinić J. National survey of indoor radon levels in Croatia. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemisty 2006;269:87-90.

[6] Radolić V, Čamilović D, Stanić D. Kontroler vremena ozračivanja detektora nuklearnih tragova. U: Zbornik radova Osmog simpozija društva za zaštitu od zračenja; 2011; Krk, Hrvatska. Zagreb:HDZZ; 2011 (ovaj Zbornik).

[7] Campi F, Caresana M, Ferrarini M, Garlati L, Palermo M, Rusconi R. Uncertainty evaluation of radon measurements with LR 115 detectors and spark counter. Radiation Protection Dosimetry 2005;111(1):59-64.

[8] Verdi L, Pegoretti S, Ferrarini M. Saturation on LR-115 radon detectors: potential and real effects on radon mapping. U: Barnet I, Neznal M, Pacherova P, ur. Radon investigations in the Czech Republic XI and the 8th international workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping; Prague 2006. str. 273-279.

SATURATION OF SPARK COUNTER DUE TO HIGH TRACK DENSITIES ON STRIPPABLE LR-115 II NUCLEAR TRACK DETECTORS

Vanja Radolić[1], Ivan Stanić[2], Igor Miklavčić[1] and Denis Stanić[1]
[1]Physics Department, Josip Juraj Strossmayer University in Osijek, Osijek, Croatia
[2]Elementary School "Darda", Darda, Croatia
vanja@fizika.unios.hr

Nuclear track etched detectors are widely used for radon measurements in homes. Track densities on strippable nuclear track detectors LR-115 II are counted by a spark counter. It works by applying an electrical field between two faces of the detector film which acts as the dielectric part of the capacitor. When sparks dash through the tracks, given electrical pulses are counted by an electronic module. The local sublimation of aluminium (which is one of the plates of the condenser) is important in avoiding the multiple counting of the same track but it may cause the electric isolation of an adjoining track. Two tracks at mutual distance lower than one spot diameter of sublimated area could be resolved as a single one and this effect is called saturation. The probability of track counting loss by saturation rises with the track density. The saturation threshold of the spark counter AIST-2V (manufacturer: V.G. Khlopkin Radium Institute, St. Petersburg, Russia) is determined. The sixty strippable nuclear track detectors LR-115 II are placed 2 cm from ^{241}Am radioactive source and exposed to radiation in different times (5, 10, 15, …, 100 s) using KVOD device. It has a constant flux of α-particles so the linear relationship between the track densities and time of irradiation is expected. The observed discrepancy between the expected and really counted track densities pointed out that the saturation threshold was about 6000 tr cm^{-2}. The obtained value enables a better estimation of reliability of radon detector used at our Department of Physics because it corresponds to radon concentration of 731 Bq m^{-3} (with the coefficient of sensitivity of the used detectors of 44.5 Bq m^{-3} / tr cm^{-2} d^{-1} and assuming one year detectors exposure). This radon concentration is the highest value our detectors could measure without counting a correction of the spark counter (at one year exposure regime) and it is 10 times higher than the average radon concentration in homes in Croatia.

DOSIMETRIC VERIFICATION AND EVALUATION OF THE 3-D CONFORMAL PAROTID GLAND-SPARING IRRADIATION TECHNIQUE FOR BILATERAL NECK TREATMENT AT UNIVERSITY HOSPITAL CENTRE ZAGREB

Nenad Kovačević, Hrvoje Hršak and Juraj Bibić
Radiophysics Unit, Clinic of Oncology, University Hospital Centre, Zagreb, Croatia
nenad.kovacevic@kbc-zagreb.hr

INTRODUCTION

3-D **Con**formal **Pa**rotid Gland-**S**paring Irradiation Technique for Bilateral Neck (ConPas) is an alternative to Intensity-modulated radiotherapy (IMRT), and is in routine use at University Hospital Centre Rebro (KBC-Rebro), Zagreb. This technique includes highly asymmetric wedged conformal multi-leaf fields and demands very precise application.

The aim of this paper is to present the dosimetric verification method of ConPas (and evaluation of ConPas applicability) as performed at KBC, taking into account the precision of the Treatment Planning System (TPS), possibilities of linear accelerator and patient set-up error. Results for two patients are shown in some details.

MATERIALS AND METHODS

In radiotherapy of bilateral neck, a conventional method consists of the irradiation with two opposed wedged lateral fields (6 MV photons, or ^{60}Co 1.25 MeV photons) plus AP supraclavicular field [1,2]. After 45 Gy, lateral fields are reduced to avoid medulla. Spinal and retro spinal regions are further boosted with two opposed electron fields (8 – 10 MeV). The method has been widely in use for many years. One of its main disadvantages is that both parotid glands (PG) (as well as submandibular glands) receive a total tumour dose > 60 Gy. As a consequence, they cease to produce saliva (xerostomia), which leads to poor life quality of the patient.

Modern radiotherapy uses IMRT technique (e.g. [1]) to diminish dose to at least one parotid gland, preserving therefore in part its functioning. IMRT includes 5 – 9 intensity modulated fields, sometimes with very small

(3×3 cm^2) in-fields and very few monitor units (MU) per fraction. Less frequently used alternative to IMRT is ConPas method, details of which have been explained elsewhere [3]. For sake of clarity, we explain briefly the method on patient ESTRO B (discussed in [4]):

Planning target volumes (PTV2 + PTV1) on Figure 1 are displayed (cyan and magenta) with boost (PTV1 magenta). Prescribed dose to PTV2 + PTV1 is 50 Gy/25 fractions. Additionally, PTV1 takes 20 Gy/10 fractions boost. There are four lateral half fields (Figures 2, 3) and two additional front (AP) half fields (Figure 4) that deliver 50 Gy/25 frac. to PTV1+2. Boost is given with two half fields plus (in this particular case) very small lateral field (Figure 5). Common isocenter is placed just in front of the vertebral corpus. All fields follow PTV conformaly, with safety margins.

Figure 1. 3D view of patient ESTRO B and PTVs. PTV2+1 cyan+magenta. PTV1 magenta. PTV1+2 has typical U shape with medulla in the middle. Right PG yellow, left PG dark blue, left submandibular gland orange. Medulla green. Yellow stripes show 1 cm silicon bolus

The aim is to keep the same V_{95} as in conventional method and to partially spare one PG (hopefully mean PG dose ≤ 32 Gy). ConPas is in routine use at our hospital.

The success of this method (as well as of IMRT) depends on a very high precision in complete radiotherapy chain of actions.

To this end, patient CT scans are taken with 2 mm slices and imported to CMS XiO 4.60 treatment planning system (TPS) [5]. The same is done with IMRT Verification Matrix Phantom [6]. ConPas treatment plan is applied to patient scan-sets. Planning is carried out with the criterion that more than 90 % of Planning Target Volume (PTV) should receive at least 95 % of the prescribed dose (PTV V_{95}) and that parotid gland, not involved in PTV, should receive the dose as low as possible (possibly < 32 Gy [7,8]). Medulla and medulla oblongata are also organs at risk and doses to them are strictly scrutinized [9,8].

Figure 2. Wedged half fields 1 and 2

Figure3. Wedged half fields 3 and 4

Figure 4. Wedged half fields 5 and 6, sagital and coronal view

Dose calculations are performed using the superposition algorithm and fine 2 mm calculation grid. The plan is fine-tuned, approved and finally accepted. The same treatment plan is then applied to IMRT Verification Matrix Phantom scan-set (i.e. using the same MLC half fields and the same 2 Gy fractionation scheme). The construction of the phantom allows placement of 0.125 cm^3 Semiflex ionization chambers (PTW) at various

locations inside it, with very high precision (Figure 6). We follow the absorbed dose to water code of practice IAEA TRS 398 [10]. For this particular patient, chambers are placed at P1: central position of PTV1, P2: central position of PTV2 and at P3: medulla. Points P1 and P2 are in regions with a low spatial gradient of absorbed dose. The chamber at P1 measures the dose to PTV (50 Gy/25) and boost dose (20 Gy/10) including very small (cca. 3×3 cm^2) field. The chamber at P2 measures the dose to PTV. The patient ESTRO B has large portions of both PGs involved in PTV and consequently PGs receive high doses.

Figure 5. Wedged half fields 7, 8 and small field 9

Figure 6. IMRT Verification Matrix Phantom with two chambers inserted.

The patient X Y with similar U shaped PTV, but with more than 50 % of the right PG out of PTV is also considered. Prescriptions are 54 Gy/27 fractions to whole PTV and 12 Gy/6 boost fractions to PTV2. PTV2 lies on the left hand side of the patient's head and neck. The same procedure is applied to this patient. Ionisation chambers are placed at Pt1-central position of PTV2, in order to measure dose to whole PTV and boost and at Pt2-medulla oblongata. In this case with ConPas technique we can spare a part of right PG.

Positioning of the patient is an important element in radiotherapy process. As a routine, thermoplastic masks are used for fixation of the head and neck. Also, an alignment between the digitally reconstructed radiographs (imported from TPS) and portal images of a patient in radiotherapy position is checked once per week. We keep the record of positioning inaccuracies for further evaluation of the overall precision and for scrutiny of PTV margins.

RESULTS

The record of the set-up errors of nine head and neck patients gives the results in the crossplane, inplane and up/down directions:

$x = -0.03 \pm 0.034$ cm; $y = -0.01 \pm 0.036$ cm; $z = 0.05 \pm 0.02$ cm (2SD).

Fixation masks in the head and neck region are very reliable and, as expected, positioning inaccuracies are well under 1 mm. One must however control regularly possible shrinkage of swollen head and neck during treatment. If it happens, new set of CT scans and new plan are produced.

Table 1 shows the results of measurements at defined spots and the doses calculated from TPS. For ESTRO B patient, at P1 there is a complete agreement of the calculated and measured dose for the main course with six fields (50 Gy/25 frac.). Three field boost course gives -1.4 % measured value, which is acceptable. It also shows that a very small (3×3 cm^2) MLC fields are well modelled within TPS. At P2 there is good agreement for main course. P2 is away from boost region and difference of 2 cGy per fraction is acceptable. P3 lies at closer medulla region. There is considerable dose gradient over spinal cord and therefore 3 % higher measured dose than calculated can be accepted.

For X Y patient, at the point Pt1 the measured dose from main eight fields (54/27) is 2 % higher than the calculated. For boost fields it is 1.4 % lower. "Medulla oblongata" at Pt2 receives 5 % smaller dose than predicted by TPS. This is also a region of a considerable dose gradient. The 5 % smaller measured dose may seem to be important, but keeping in mind dose gradients and a fact that Pt2 is placed on a healthy organ at risk, this result does not raise serious concern. The same stands for boost fields where there is 2 cGy less measured dose per fraction for Pt2.

Dose volume histogram (DVH) for X Y patient (Figure 7) shows that mean dose to right parotid gland is 3273 cGy and that about 50 % of the gland receives less than 3200 cGy throughout the whole treatment. This dose should partly preserve the gland's function [7, 8].

DVHs for both patients show better PTV dose coverage than V_{95} constraint. For ESTRO B case, 94 % of PTV1+2 receives at least 95 % of prescribed dose, and 95% of boost region receives at least 95 % of dose. In X Y case, 95 % of PTV1+2 receives at least 95 % of dose. 95 % of boost volume takes at least 90 % of prescribed dose.

Table 1. Results for two patients. All values in cGy

ESTRO B	P1 PTV	Right	P2 PTV	Left	P3 medulla	
	Main c.	Boost	Main c.	Boost	Main c.	Boost
TPS	203	219	190	11	165	30
Measured	203	216	189	13	170	32

X Y	Pt1 PTV		Pt2 medulla oblong.	
	Main c.	Boost	Main c.	Boost
TPS	203,5	201	147	15
Measured	208	198	141,5	13

Figure 7. Dose Volume Histogram for patient X Y

CONCLUSION

ConPas is a rather sophisticated method and demands high precision in the whole radiotherapy process. Verification of ConPas using IMRT Verification Matrix Phantom shows good agreement between measured and predicted doses inside and outside PTV regions of the head and neck. Furthermore, a careful track of the positioning during the treatment shows that the overall set-up error is very small (practically negligible). When possible, one parotid gland may be partially spared, and therefore its function preserved at least to some extent.

REFERENCES

[1] Perez and Brady's Principles and practice of radiation oncology, 5th edition. Lippinkott Williams&Wilkins 2008.

[2] Khan FM. Treatment Planning in radiation oncology 2nd edition. Lippinkott Williams&Wilkins 2007.

[3] Wiggenraad R, Mast M, van Santvoort J, Hoogendoorn M, Struikmans H. Strahlenther Onkol 2005;181:673-682.

[4] ESTRO Teaching Course: Physics for Clinical Radiotherapy, 17. – 21.10. 2010. Budapest, Hungary.

[5] CMS XiO 4.60 Elekta CMS Software

[6] IMRT Verification Matrix Phantom PTW Freiburg

[7] QUANTEC Deasy JO, Moiseenko V, Marks L, Chao KSC, Nam J, Eisenbruch A. Radiotherapy Dose-Volume Effects on Salivary Gland Function. Int J Radiat Oncol Biol Phys 2010;76(3), Suppl pp. S58-S63.

[8] Emami B, Lyman J, Brown A, et al. Tolerance of normal tissue to therapeutic irradiation. Int J Radiat Oncol Biol Phys 1991;21:109-122.

[9] QUANTEC Kirkpatrick JP, van der Kogel AJ, Schultheiss T. Radiation Dose-Volume effects in the spinal cord. Int J Radiat Oncol Biol Phys 2010; 76(3), Suppl pp. S42-S49.

[10] International Atomic Energy Agency (IAEA). Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. Technical Reports Series No. 398. Vienna: IAEA; 2000.

KALIBRACIJA BRAHITERAPIJSKOG IZVORA ^{192}Ir VELIKE BRZINE DOZE: ANALIZA REZULTATA I NEPOUZDANOSTI

Tomislav Bokulić[1], Iva Mrčela[1], Mirjana Budanec[1], Branko Vekić[2], Ana Fröbe[1] i Zvonko Kusić[1]
[1]Klinika za onkologiju i nuklearnu medicinu,
KBC "Sestre milosrdnice", Zagreb
[2]Institut Ruđer Bošković, Zagreb
tbokulic@kbsm.hr

UVOD

Jedan od najznačajnijih koraka u programu osiguranja kvalitete brahiterapije radioaktivnim izvorima velike brzine doze (engl. *high dose rate* – HDR), je određivanje referentne brzine kerme u zraku (eng. *reference air kerma rate – RAKR*). Mjerenje *RAKR* ili jakosti kerme u zraku (engl. *air kerma strenght*), odnosno kalibracija svakog novo instaliranog HDR izvora, provodi se u radioterapijskom centru neovisno o dostavljenoj proizvođačkoj specifikaciji – certifikatu izvora. U Klinici za onkologiju i nuklearnu medicinu, KBC "Sestre milosrdnice" se uređaj za naknadno uvođenje (engl. *remote afterloading device*) s izvorom iridija (^{192}Ir), Gammamed 12i (Varian, SAD), aktivnosti oko 10 Ci (oko 370 GBq), upotrebljava u HDR brahiterapiji ginekoloških karcinoma, te karcinoma nazofaringsa, jednjaka i bronha, već 10 godina. Izvor se mijenja svaka 3 – 4 mjeseca. Tijekom postupka izmjene izvora, planski se provodi niz sigurnosnih i tehničkih provjera samog uređaja za uvođenje izvora, upravljačke konzole te komunikacije računala s konzolom i uređajem.

HDR izvori se uobičajeno kalibriraju jednom od triju tehnika [1-3]: (1) mjerenjima u zraku pomoću Farmerove komorice uz odgovarajuće koeficijente kalibracije koji su dostupni putem sekundarnog standardnog laboratorija, (2) mjerenjima velikom ulaznom ionizacijskom komorom (engl. *re-entrant, well type chamber*) s posebnim držačem izvora, i (3) mjerenjima Farmerovom komoricom i aplikatorom s izvorom smještenima u plastičnom fantomu koji osigurava njihov točni i reproducibilni položaj.

U ovom radu prikazani su rezultati kalibriranja 23 izvora pomoću ulazne ionizacijske komore (Standard Imaging, Wisconsin, USA) velikog volumena (tehnika (2)). Odstupanja mjerenih od proizvođačkih specifikacija

uspoređena su s podacima iz literature. Načinjena je i procjena nepouzdanosti mjerenih *RAKR* veličina.

MATERIJAL I METODE

RAKR izvora ^{192}Ir velike brzine doze, promjera 0,6 mm i duljine 3,5 mm, određivana je redovito nakon provedene instalacije novog izvora. Uporabom kalibrirane ulazne ionizacijske komore, *RAKR* se može odrediti prema sljedećem izrazu [1,2]:

$$RAKR = N_{kal} \cdot I_{ion} \qquad (1)$$

gdje je N_{kal} kalibracijski faktor komore, I_{ion} struja ionizacije korigirana za veličine koje utječu na mjerenu struju:

$$I_{ion} = I_m \cdot k_{el} \cdot k_r \cdot k_{Tp} \qquad (2)$$

I_m je mjerena struja ionizacije korigirana za struju propuštanja (engl. *leakage*), k_{el} je kalibracijski koeficijent elektrometra, k_r korekcija zbog rekombinacije, a k_{Tp} korekcija tlaka i temperature aktualnih mjerenja u odnosu na referentna mjerenja istaknuta na kalibracijskom certifikatu. Korekcija zbog rekombinacije [2] računa se metodom mjerenja struje (naboja) ionizacije prema izrazu:

$$1/k_r = 4/3 - 1/3 \cdot (Q_1/Q_2) \qquad (3)$$

gdje su Q_1 i Q_2 količine naboja mjerene komorom uz primjenu dva značajno različita napona (npr. 300 V i 150 V). U rutinskim postupcima kalibracije 23 izvora ^{192}Ir korištena je ulazna ionizacijska komora, kalibrirani elektrometar, termometar i barometar (Tablica 1).

Postupci su provođeni prema pisanom protokolu temeljenom na proizvođačkim specifikacijama i međunarodnim preporukama [1,2]. Višestruka mjerenja s dva izvora provedena su paralelno s dva kompleta identičnih ionizacijskih komora i sličnim elektrometrima (Tablica 1). Njima je ispitana preciznost mjerenja struje ionizacije i stabilnost odziva tijekom nekoliko tjedana mjerenja *RAKR*, neposredno prije izmjene izvora (~167,3 GBq) i kod potpuno novog izvora, odmah nakon njegove izmjene (~521,3 GBq). Određene su korekcije zbog rekombinacije te su ispitana svojstva osjetljivosti odziva komore obzirom na blizinu raspršujućeg sredstva i na aksijalni položaj izvora unutar komore.

Tablica 1. Opis i tehničke karakteristike mjerne opreme upotrijebljene u kalibraciji izvora i u dodatnim mjerenjima (IK – ionizacijska komora)

	IK 1	**IK 2***
Proizvođač i model	Standard Imaging, HDR 1000 +	
Elektrometar	DCX 2000	MAX4000
Volumen (cm^3)	245	
Napon napajanja (V)	+ 300	
Efikasnost sakupljanja naboja	0,999	
Referentna točka mjerenja	50 mm	
Kalibracijski koeficijent	4,67E+05 $Gy\ m^2\ h^{-1}\ A^{-1}$	4,647E+05 $Gy\ m^2\ h^{-1}\ A^{-1}$
Nepouzdanost kalibracije	3 % (k = 2)	3 % (k = 2)

** Ionizacijska komora IK2 i elektrometar su u vlasništvu Instituta Ruđer Bošković*

Procjena nepouzdanosti u određivanju vrijednosti struje ionizacije određena je prema formalizmu NIST-a [4]. Procjena uključuje nepouzdanosti korekcijskih faktora temperature, tlaka i elektrometra kao i nepouzdanosti preuzetih iz certifikata referentne opreme – kalibracijski koeficijent ovlaštenog laboratorija. U mjerenjima struje u obzir su uzete nepouzdanosti zbog očitanja elektrometra, razlučivanja očitanja, stabilnosti komore i linearnosti. Nepouzdanost korekcije zbog rekombinacije je procijenjena na istu veličinu kao i korekcija sama.

REZULTATI

Na Slici 1 su prikazani rezultati postotnih odstupanja mjerenih i proizvođačkih specifikacija *RAKR* za 23 izvora ^{192}Ir. Odstupanja svih mjerenja nalaze se unutar granica ± 3,5 %, dok su ona za posljednjih 16 izvora unutar ± 2 %. Preciznost mjerenja struje ionizacije ocijenjena je standardnom devijacijom srednje vrijednosti očitanja (n = 10) tijekom nekoliko tjedana za obje komore. Ona ni u jednom slučaju nije prelazila 0,01 %. Razlike mjerenih *RAKR* (komorama 1 i 2), za dva izvora, bile su tijekom nekoliko tjedana manje od 0,6 %, a prema proizvođačkoj specifikaciji manje od 0,9 %. U mjerenjima u kojima se određivala aksijalna osjetljivost komora, najveća je struja ionizacije zabilježena na 50 mm udaljenosti od njihova dna. Unutar ± 5 mm od ovog položaja izvora, mjerene struje su bile manje do 0,2 % od najveće zabilježene struje ionizacije.

Primjenom izraza (3) za procjenu efikasnosti sakupljanja iona u komori, odnosno rekombinacije k_r na oba polariteta, dobiven je rezultat 1,0008 za obje komore. Ti su podaci u suglasju s proizvođačkim specifikacijama.

Učinak polariteta napona napajanja, iskazan kao postotna promjena očitanja elektrometra nakon izmjene polariteta napona napajanja komore, iznosio je 0,06 % i 0,02 % za komore 1 i 2. Konzistentni postupak kalibracije izvora osiguran je postizanjem dobre toplinske ravnoteže mjerne opreme, ranog uključivanja elektrometra prije mjerenja, predzračenja komore i uspostavom geometrijski reproducibilnih uvjeta uz minimalni utjecaj raspršenog zračenja [5,6]. Uveden je tijekom nekoliko posljednjih godina i pokazalo se da korelira s postupno smanjenom razlikom između mjerene i proizvođačke *RAKR* specifikacije izvora (Slika 1).

Kombinirana proširena nepouzdanost mjerene *RAKR* vrijednosti primjenom formalizma [4] iznosi 3,1 % uz faktor pokrivenosti k = 2.

Slika 1. Odstupanja mjerenih *RAKR* ($RAKR_m$) od proizvođačkih *RAKR* ($RAKR_p$) vrijednosti 23 izvora ^{192}Ir.

Podaci iz literature o srednjim omjerima mjerenih aktivnosti izvora ili *RAKR* vrijednosti i proizvođačkih vrijednosti, prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2. Usporedba srednjih vrijednosti i standardnih devijacija omjera mjerenih vrijednosti aktivnosti (*) ili *RAKR* ($^{+}$) izvora i proizvođačkih specifikacija. *N* je broj mjerenih izvora.

Autor	**Godina**	***N***	**Raspon**	**Omjer**
Ezzell * [7]	1989	29	0,961 – 1,132	1,04 ± 0,044
Venselaar* [8]	1993	16	0,958 – 1,068	1,018
Nair* [9]	1996	21	0,920 – 1,032	0,98 ± 0,03
$^{i)}$Carlsson^{+} [10]	2008	14	0,996 – 1,026	1,01 ± 0,01
Ovaj rad^{+}	2010	23	0,969 – 1,033	1,00 ± 0,01

$^{i)}$ vrijednosti u tablici su procijenjene s grafa dostupnog u navedenom radu

Rezultati mjerenja *RAKR* dobiveni u ovom radu su u veoma dobrom suglasju s rezultatima centara u kojima se niz godina provodi HDR brahiterapija. Tijekom godina su postignute sve manje vrijednosti odstupanja korisničkih od proizvođačkih kalibracija, uz smanjenje nepouzdanosti omjera. Na to su utjecali učinci poput: poboljšane konstrukcije ionizacijske komore, bolja toplinska izolacija držača komore, sistematsko otklanjanje drugih izvora nepouzdanosti u mjerenju struje ionizacije poput doprinosa raspršenog zračenja i konačno, smanjenje nepouzdanosti kalibracijskog koeficijenta izvora koja primjenom međukalibracije na temelju interpolacije [2,3], uglavnom iznosi 3 % na razini pouzdanosti od 95 % (k = 2). Nedavno su uspostavljeni laboratoriji koji osiguravaju primarne standarde *RAKR* veličina HDR izvora ^{192}Ir, s nepouzdanostima koje su usporedive s onima koje tipično susrećemo u dozimetriji vanjske radioterapije.

ZAKLJUČAK

Uz pažljivu primjenu kalibracijskog protokola temeljenog na međunarodnim preporukama i specifikacijama mjerne opreme, moguće je postići veliku točnost kalibracije izvora ^{192}Ir velike brzine doze. Prednosti kalibracije izvora pomoću ionizacijske komore velikog volumena očituju se u jednostavnosti i kratkoći mjerenja, te velikoj stabilnosti odziva komore. Za ispravan višegodišnji rad s ionizacijskim komorama ovog tipa potrebno je osigurati redovito kalibriranje u sekundarnom standardnom laboratoriju barem jedne komore iz Hrvatske, kako bi se njezinom usporedbom s komorama u radioterapijskim odjelima osigurala sljedivost.

LITERATURA

[1] Venselaar J, Pérez-Calatayud J, editors. A practical guide to quality control of brachytherapy equipment: ESTRO booklet No. 8., 2004.

[2] International Atomic Energy Agency, IAEA. Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy. IAEA TECDOC-1274. Vienna: IAEA; 2002.

[3] Goetsch SJ, Attix FH, Pearson SW, Thomadsen BR. Calibration of ^{192}Ir high-dose-rate afterloading systems. Med Phys 1991;18:462-467.

[4] International Organization for Standardization, ISO. Guide to the expression of uncertainties in measurements. 1995.

[5] Bokulić T, Budanec M, Mrčela I, Fröbe A, Kusić Z. Calibration of a Gammamed 12i Ir-192 High dose rate source. U: Garaj-Vrhovac V, Kopjar N, Miljanić S. ur. Zbornik radova Šestog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja; 18-20. travnja 2005; Zagreb, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2005. str. 134-39.

[6] Podgorsak MB, DeWerd LA, Thomadsen BR, Paliwal BR. Thermal and scatter effects on the radiation sensitivity of well chambers used for high dose rate Ir-192 calibrations. Med Phys 1992;19:1311–4.

[7] Ezzell, G. A. Calibration intercomparison of an Ir-192 source used for high dose rate remote afterloading. Activity (Selectron users' News Lett.) 1989; 3:13- 14..

[8] Nair TKM, Cheng M, Barker A, Rouse BS. High dose rate (HDR) brachytherapy technique: For carcinoma of uterine cervix using Nucletron Applicators. Med Dosim 1995;20:201-207.

[9] Venselaar JIM, Brouwer WFM, van Straaten BHM, Albers AHL. Intercomparison of calibration procedures for Ir-192 HDR sources in The Netherlands and Belgium. Radiother Oncol 1994;30:155-161.

[10] Carlsson Tedgren Å, Grindborg J-E. Audit on source strength determination for HDR and PDR192Ir brachytherapy in Sweden. Radiother Oncol 2008; 86:126-30.

HIGH DOSE RATE ^{192}Ir SOURCE CALIBRATION: ANAYSIS OF RESULTS AND UNCERTAINTIES

Tomislav Bokulić[1], Iva Mrčela[1], Mirjana Budanec[1], Branko Vekić[2], Ana Fröbe[1] and Zvonko Kusić[1]
[1]Department of Oncology and Nuclear Medicine,
University Hospital "Sestre milosrdnice", Zagreb, Croatia
[2]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
tbokulic@kbsm.hr

A lack of primary standards for HDR ^{192}Ir brachytherapy has been known for years to cause the largest problem in obtaining lower uncertainties in *RAKR* measurements. The currently used calibration techniques where chambers are calibrated against interim standards, based on interpolation techniques, provide typically an uncertainty of ± 2.5 % (k = 2) in the calibration factor. It constitutes the largest contribution to the total uncertainty in *RAKR* and may be significantly reduced through the on-going development of primary standards.

In this work, *RAKR* values of 23 HDR ^{192}Ir sources were measured in the department in the past 10 years of clinical HDRBT application. All differences between the measured *RAKR* and manufacturer's specification were lower than ± 3.5 %. Upon the acceptance of a more rigorous protocol, through which the different variables, such as thermal stability and geometrical reproducibility, have been better controlled during the measurement, these differences dropped to less than ± 2 %. Two ionisation chambers tested in this work showed very good precision, long term stability, small polarity effect and recombination equal to the manufacturer's specification. Differences in repeated measurements of *RAKR* during the 6 weeks period, in which a source was also changed, were minimal; *RAKR*-s stayed within 1 %. The calibration technique based on the re-entrant well type chamber is due to its simplicity, speed, accuracy and long term stability a highly recommended option for an institution performing HDR brachytherapy.

BIOLOŠKI UČINCI ZRAČENJA

BIOLOGICAL EFFECTS OF RADIATION

UTJECAJ POLIMORFIZAMA GENA ZA POPRAVAK DNA NA RAZINU POSTOJANIH OŠTEĆENJA GENOMA U LJUDSKIM LIMFOCITIMA IZAZVANIH NAKON IZLAGANJA IONIZIRAJUĆEM ZRAČENJU OD 2 Gy

Mirta Milić[1], Ružica Rozgaj[1], Vilena Kašuba[1], Dragan Kubelka[2], Sabrina Angelini[3] i Patrizia Hrelia[3]

[1]Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb, Hrvatska
[2]Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, Zagreb, Hrvatska
[3]Department of Pharmacology, University of Bologna, Bologna, Italija
mmilic@imi.hr

UVOD

Utjecaj individualne predispozicije u staničnom odgovoru na izloženost niskim dozama ionizirajućeg zračenja značajniji je od utjecaja duljine trajanja te izloženosti [1,2]. Varijacije mogu biti rezultat promjena u ekspresiji gena, ali i posljedica polimorfizama gena koji kodiraju za proteine uključene u različite mehanizme popravka oštećene DNA [3-8].

Cilj istraživanja bio je primjenom mikronukleus (MN) testa utvrditi razinu postojanih oštećenja u genomu limfocita periferne krvi ispitanika profesionalno izloženih zračenju i odgovarajuće kontrolne skupine nastalih nakon izlaganja ionizirajućem zračenju pri dozi od 2 Gy, te istražiti povezanost statusa polimorfnosti gena koji sudjeluju u popravku DNA s nastalim oštećenjima i dinamikom stanične diobe.

MATERIJAL I METODE

U istraživanju je sudjelovalo 40 zdravih dobrovoljnih darivatelja venske krvi oba spola: 20 zdravstvenih radnika nepušača profesionalno izloženih niskim dozama ionizirajućeg zračenja, te 20 ispitanika odgovarajuće dobi, spola i navika pušenja koji su predstavljali kontrolnu skupinu. Krv za potrebe MN-testa izvađena je u sterilne heparinizirane spremnike, dok su uzorci namijenjeni izolaciji DNA uzimani u spremnike s etilendiamintetraoctenom kiselinom. Svi uzorci krvi ozračeni su gama-zračenjem doze 2 Gy. Zračenje je provedeno u posebnom nosaču ("fantomu") od pleksi stakla koji je bio postavljen na udaljenosti od 80 cm od izvora izotopa kobalta ^{60}Co (uređaj Alcyon, CGR-MeV smješten u Institutu Ruđer Bošković u Zagrebu).

Kulture limfocita za MN-test pripremljene su u triplikatu prema standardnoj metodi [9]. Analiza preparata provedena je pod svjetlosnim mikroskopom, pri povećanju od 1000×. Po uzorku je pregledano 1000 binuklearnih limfocita s očuvanim citoplazmama u kojima je utvrđivana učestalost i raspodjela MN [10] te indeks diobe jezgara [11].

Genomska DNA izolirana je iz limfocita periferne krvi prema modificiranom protokolu [12] ili protokolu tvrtke QUIAGEN za izolaciju genomske DNA limfocita iz pune krvi (mini KIT). Uzorci su razrijeđeni do koncentracije od 10 ng μL^{-1} i pohranjeni na -20 °C do početka postupka amplifikacije. Na izoliranoj DNA provedeno je određivanje polimorfizama gena koji sudjeluju u: A) popravku isijecanjem baza – gen APE1 (apurinska/ apirimidinska endonukleaza, Asp148Glu), gen hOGG1 (ljudska 8 - oksoogvanin glikozilaza, Ser326Cys), gen XRCC1 (X-ray repair cross-complementing protein-group 1, Arg194Trp); B) popravku isijecanjem nukleotida – gen XPD (Xeroderma pigmentosum-group D, Lys751Gln); C) popravku dvolančanih lomova u molekuli DNA – gen XRCC3 (X-ray repair cross-complementing protein-group 3, Thr241Met), gen PARP1 (poli ADP riboza-polimeraza 1, Val762Ala); D) popravku nehomolognih krajeva – gen MGMT (metil-gvanin DNA metil-transferaza, Leu84Phe).

U statističkoj analizi rezultata primijenjeni su t-test i neparametrijski Mann-Whitney U-test (MW), za usporedbu parametara među skupinama, multipla regresijska analiza za analizu utjecaja parametara na cijelu skupinu, te Spearmanova korelacija za analizu promatranih parametara i parametara oštećenja (STATISTICA 9, StatSoft, Tulsa, SAD).

REZULTATI

Značajke ispitivane populacije s obzirom na dob, spol, duljinu radnog staža i prosječnu dozu zračenja registriranu dozimetrima (zbroj registriranih doza za vrijeme trajanja rada u zoni zračenja) prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Opće značajke istraživane populacije

Značajke	Izložena skupina	Kontrolna skupina
Broj ispitanika	20	20
Broj žena/muškaraca	9/11	9/11
Dob ± S.D. / (Raspon)	41,40 ± 9,62 / (25-60)	41,40 ± 9,76 / (25-60)
Radni staž ± S.D. / (Raspon)	12,13 ± 7,14 / (1-28)	-
Izloženost ± S.D. / (Raspon)	4,06 ± 9,77 / (0-36,50)	-

Učestalost MN i NDI u kontrolnoj i izloženoj skupini prikazani su na Slici 1. Učestalost MN kod ispitanika izložene skupine nakon zračenja (MN-2Gy) bila je viša nego kod kontrolne skupine, no zbog velike varijabilnosti razlike nisu bile statistički značajne. S druge strane, ozračivanje krvi značajno je utjecalo na kinetiku staničnih dioba (Mann Whitney U-test, p = 0,04). Multipla regresijska analiza pokazala je pozitivnu korelaciju polimorfnih gena APE1 i XRCC3 s MN u cijeloj skupini prije zračenja (p = 0,055; F = 1,48; β APE1 = 0,4; β XRCC3 = -0,34).

Slika 1. Učestalost MN i NDI u ispitivanoj populaciji prije i nakon zračenja uzoraka krvi

Dob ispitanika u cijeloj ispitivanoj populaciji pozitivno je korelirala sa učestalošću MN u ozračenim uzorcima (MN-2Gy) (R = 0,42; p = 0,007), te negativno s indeksom dioba jezgra prije zračenja (NDI, R = -0,35; p = 0,03) i poslije zračenja (NDI-2Gy, R = -0,35; p = 0,03). Proučavajući utjecaj spola, uočena je negativna korelacija ženskog spola i MN-2Gy (R = -0,31; p = 0,05). Kod žena je također nađena korelacija polimorfnih varijanti gena hOGG1 (R = -0,48; p = 0,05), APE1 (R = 0,47; p = 0,06) i XRCC3 (R = -0,05; p = 0,04) s MN; XRCC1 (R = -0,48; p = 0,05) s MN-2Gy; te APE1 (R = -0,54; p = 0,02) i PARP1 (R = -0,45; p = 0,07) s NDI-2Gy. Kod muškaraca je nađena korelacija dobi ispitanika s NDI (R = -0,45; p = 0,03), s MN-2Gy (R = 0,45; p = 0,03) te s NDI-2Gy (R = -0,49; p = 0,02). Izložena i kontrolna skupina razlikovale su se samo u NDI-2Gy (MW, p = 0,04). Razliku je pokazao i t-test (p = 0,03), a razlika u MN-2Gy nije bila statistički značajna (p = 0,07). U izloženoj skupini nađena je korelacija duljine izloženosti (R = 0,52; p = 0,02), dobi (R = 0,45; p = 0,05), radnog staža (R = 0,47; p = 0,04) s MN-2Gy i profesionalno primljene doze zračenja (R = -0,52; p = 0,02). Uočena je negativna korelacija između ženskog spola i MN-2Gy (R = -0,55; p = 0,01). Nakon podjele po zanimanjima u dvije određene skupine, uočena je pozitivna korelacija između MN-2Gy i zanimanja druge skupine u koju su spadali radiolozi, inženjeri medicinske radiologije, kirurzi i invazivni

kardiolozi (R = 0,44; p = 0,05; (129,13 ± 39,96) MN druge skupine *vs.* (93,33 ± 36,74) MN prve skupine: gastroenterolozi, anesteziolozi, medicinske sestre). Nakon usporedbe po spolu, pokazana je značajna razlika u MN-2Gy, gdje su muškarci imali veće vrijednosti (MW, p = 0,05; (125,82 ± 37,58) MN *vs.* (85,44 ± 35,32) MN).

Slika 2. Učestalost MN po genotipovima u ispitivanoj populaciji prije i nakon ozračivanja uzoraka krvi dozom zračenja od 2 Gy.
HO – homozigoti; VAR – varijante
MN HO prije zračenja, MN HO-2Gy poslije zračenja,
MN VAR prije zračenja, MN VAR-2Gy poslije zračenja

ZAKLJUČAK

Ovo je istraživanje potvrdilo vrijednost MN-testa kao osjetljive metode za analizu i procjenu trajnih oštećenja genoma nakon izloženosti ionizirajućem zračenju. Dobiveni rezultati također upućuju na vrijednost analize polimorfizama gena te sugeriraju mogućnost njene primjene zdravstvenom nadzoru populacija profesionalno izloženih zračenju.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu MZOŠ (projekt broj 22-0222148-2137).

LITERATURA

[1] Andreassi MG, Cioppa A, Botto N, Joksic G, Manfredi S, Federici C, Ostojic M, Rubino P, Picano E. Somatic DNA damage in interventional cardiologists: a case-control study. FASEB J 2005;19:998-999.

[2] Andreassi MG, Foffa I, Manfredi S, Botto N, Cioppa A, Picano E. Genetic polymorphisms in XRCC1, OGG1, APE1 and XRCC3 DNA repair genes, ionizing radiation exposure and chromosomal DNA damage in interventional cardiologists. Mutat Res 2009;666:57-63.

[3] Hu Z, Ma H, Chen F, Wei Q, Shen H. XRCC1 polymorphisms and cancer risk: a meta-analysis of 38 case-control studies. Cancer Epidemiol Biomarkers Prevent 2005;14:1810-1818.

[4] Hung RJ, Hall J, Brennan P, Boffetta P. Genetic polymorphisms in the base excision repair pathway and cancer risk: a HuGE review. Am J Epidemiol 2005;162:925-942.

[5] Parl FF. Glutathione S-transferase genotypes and cancer risk. Cancer Lett 2005;221:123-129.

[6] Weiss JM, Goode EL, Ladiges WC, Ulrich CM. Polymorphic variation in hOGG1 and risk of cancer: a review of the functional and epidemiologic literature. Mol Carcinogen 2005;42:127-141.

[7] Kotsopoulos J, Chen Z, Vallis KA, Poll A, Ainsworth P, Narod SA. DNA repair capacity as a possible biomarker of breast cancer risk in female BRCA1 mutation carriers. Br J Cancer 2007;96:118-125.

[8] Milić M. Važnost individualne osjetljivosti za procjenu rizika od oštećenja genoma pri kroničnoj profesionalnoj izloženosti niskim dozama ionizirajućeg zračenja [disertacija]. Zagreb: Biološki odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; 2010.

[9] Fenech M, Morley AA. Cytokinesis-block micronucleous method in human lymphocytes: effect of *in vivo* aging and low dose X-irradiation. Mutat Res 1986;161:193-198.

[10] Fenech M, Chang WP, Kirsch-Volders M, Holland N, Bonassi S, Zeiger E. HUMN project: detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. Mutat Res 2003;534:65-75.

[11] Eastmond DA, Tucker JD. Kinetochore localization in micronucleated cytokinesis-blocked chinese hamster ovary cells: a new and rapid assay for identifying aneuploidy-inducing agents. Mutat Res 1989;224:517-525.

[12] Daly AK, Steen VM, Fairbrother KS, Idle JR. CYP2D6 multiallelism. Meth Enzymol 1996;272:199-210.

INFLUENCE OF SNP POLYMORPHISMS IN DNA REPAIR GENES ON THE LEVEL OF PERSISTENT DAMAGE IN HUMAN LYMPHOCYTES AFTER EXPOSURE TO 2 Gy OF IONISING RADIATION

Mirta Milić[1], Ružica Rozgaj[1], Vilena Kašuba[1], Dragan Kubelka[2], Sabrina Angelini[3] and Patrizia Hrelia[3]
[1]Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
[2]State Office for Radiological and Nuclear Safety, Zagreb, Croatia
[3]Department of Pharmacology, University of Bologna, Bologna, Italy
mmilic@imi.hr

Variation in cell response to ionising radiation could be result of changes in gene expression and/or polymorphisms of DNA repair genes. The aim of the study was to estimate the DNA damage level in human lymphocytes after exposure to 2 Gy of ionising radiation. Medical workers occupationally exposed to low doses of ionising radiation (N = 20) and matched controls (N = 20) were genotyped for polymorphic hOGG1, XRCC1, APE1, XPD10, XPD23, XRCC3, PARP1 and MGMT genes. Micronucleus (MN) test was used for the estimation of DNA damage before and after radiation. Incidence of MN in irradiated samples positively correlated with age and negatively with polymorphic variants of XPD23. Significant difference was observed between irradiated homozygotes (HO) and heterozygotes (HE). HO and HE APE1 differed in MN before exposure. HO and polymorphic variants of XPD10 differed in MN after exposure. Gender showed different MN in the exposed group after exposure. Age correlated positively with MN after exposure, working probation and received dose. Multiple regression analysis revealed connection between polymorphic variants of APE1 and XRCC3 with MN before exposure. These results confirm the value of micronucleus assay in DNA damage estimation and suggest possible use of polymorphic genes in monitoring of individuals professionaly exposed to ionising radiation.

ALKALINE COMET ASSAY AND MICRONUCLEUS TEST PARAMETERS IN CHILDREN EXPOSED TO DIAGNOSTIC X-RAY EXAMINATION

Goran Gajski[1], Đurđica Milković[2], Mária Ranogajec-Komor[3], Saveta Miljanić[3], Željka Kneževič[3], Natko Beck[2], Marko Gerić[1] and Vera Garaj-Vrhovac[1]

[1]Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
[2]Children Hospital Srebrnjak, Zagreb, Croatia
[3]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
vgaraj@imi.hr , ggajski@imi.hr

INTRODUCTION

In paediatric hospitals and departments radiological examinations are critical for the evaluation of diseases of the lung and other internal organs, yet there is always the need to perform these tests in the safest way possible. Chest radiograms represent the basic radiological examination of thorax and are the most frequently performed radiological diagnostic procedure in the child population [1,2]. Understanding the risks of low doses of radiation is an important aspect in the risk benefit analysis in paediatric populations. To provide the best care for the young patients the effects of radiation should be minimized thus chest X-rays must be performed by highest standards to ensure that the young patient has the lowest risk possible [3,4].

Since children are the most sensitive to radiation, there is a need for follow up of the young populations that receive these X-ray diagnostic examinations [1,3]. Follow up would be especially advisable for children that are at higher risk of radiation induced damage, for example children with a predisposition to DNA damage, or for children that are constantly exposed to numerous radiological examinations due to their illness [5-7]. In that manner, present study was undertaken to evaluate application of different dosimetry systems in conjunction with alkaline comet assay and micronucleus test for the assessment of different types of DNA and chromosomal alterations in child population exposed to acute diagnostic X-rays examination. For that purpose doses were measured using thermoluminescence (TL) and radiophotoluminescent (RPL) dosimetry systems.

SUBJECTS AND METHODS

Eighteen children (12 girls and 6 boys), between the ages of 6 and 14 years (11.83 ± 2.18) were selected randomly, all with pulmonary diseases. None of the assessed children was exposed to ionising radiation or antibiotics prior to blood sampling. Diagnostic chest X-rays and clinical pathology exams of blood samples were warranted because of the children's health conditions. Blood samples were taken from veins in the antecubital fossae prior to, and exactly 30 minutes after X-ray examination. They were analyzed immediately after the sampling using the alkaline version of the comet assay and micronucleus assay.

The X-ray examinations of the thorax were carried out in posterior-anterior (PA) projection on 150 kV Shimadzu CH-200M unit (Tokyo, Japan). The conditions of exposure were normal for routine diagnostic procedures. The parameters of the irradiation were the following: the voltage of the X-ray tube varied in the range 95 kV – 105 kV, the quantity of charge 2 mAs – 3.6 mAs, the time of irradiation 5 ms – 11 ms. Two types of dosimetry systems were used in this research, RPL glass dosimetry system and TL dosimetry system based on LiF:Mg,Cu,P (Table 1). Absorbed dose measurements were conducted for posterior-anterior (PA) projection on the forehead, thyroid gland, gonads, chest and back. RPL dosimeters were not placed on chest and the back to ensure the radiogram quality.

Table 1. The evaluation parameters of the investigated detectors

Dosimeter	**Radiophotoluminescent dosimetry system (RPL)**	**Thermoluminescence dosimetry system (TL)**
Material	silver activated phosphate glass	LiF:Mg,Cu,P
Origin	Japan	China
Size (mm)	15 × 15	ϕ 4.5 × 0.8
Preirradiation annealing		
Temperature (^{o}C)	400	240
Time (min)	60	10
Preheat		
Temperature (^{o}C)	70	100
Time (min)	60	20
Readout	UV excitation	
Temperature (^{o}C)		220
Time (s)		30

To estimate the level of primary DNA damage and chromosomal alterations after exposure to low X-rays the comet assay was carried out under alkaline conditions [8]. For the micronucleus test lymphocyte cultures were incubated according to standard protocol as described by Fenech [9].

RESULTS

The X-radiation exposures measured on the back of 18 patients varied from 0.13 mSv to 0.29 mSv, whereas X-radiation exposures measured on the sternum ranged from 0.01 mSv to 0.04 mSv. Thyroid exposures ranging from 0.02 mSv to 0.06 mSv were in good correlation with the back exposures and were on average 7 times lower. Exposures of gonads and forehead were even lower, ranging from 0 mSv to 0.01 mSv. The exposures measured with TL and RPL dosimeters were in agreement within measurement uncertainty (differences within 0.03 mSv). The measured entrance dose range on 20 patients (0.13 mSv to 0.29 mSv) is in good agreement with the literature data [10].

Mean values of the comet assay and micronucleus test parameters before and after X-ray diagnostics are summarized in the Figure 1. It was shown that after diagnostic X-rays, the mean percentage of DNA in tail as alkaline comet assay parameter and the total number of micronuclei were significantly higher ($P < 0.05$) than prior to diagnostic procedure.

Figure 1. Mean group values for % of DNA in tail and total number of micronuclei in blood samples of children with pulmonary diseases before and after exposures to X-ray diagnostic examination.
* Statistically significant *vs*. before X-ray diagnostics examination ($P < 0.05$).

CONCLUSION

This study demonstrated that immediately after exposure to diagnostic X-irradiation, mean percentage of DNA in tail of the comets, which is indirect measures of DNA damage, was significantly changed. The same was noticed for mean total number of micronuclei as well. It was shown that children with pulmonary diseases subjected to diagnostic procedure develop a significant increase in mean total number of each measured parameter which are the biomarkers of genetic damage for carcinogenesis, than prior to diagnostic procedure and that interindividual differences exist for each monitored child. Our results show that genetic damage arises even from chest X-ray examinations, considered to be the least harmful of them all, taken that the dose may pose as a risk surrogate. The genetic damage increases or decreases linearly with radiation dose. Therefore, it must be expected that the risk of tumour induction is increased to above the normal background even by the smallest doses. Radiation protection should be based upon the principles that there should be no risk without a benefit, no individual should exceed the prescribed limits, and in every circumstance of diagnostic exposure of patients, the ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principle must be applied. This principle should be followed because of the potential harmful effects of radiation and the high number of early age individuals exposed annually to the diagnostic radiology. Thus it would be useful to conduct more research in paediatric diagnostics to minimize the potential damage and maintain the optimal benefit for the young patients.

Acknowledgment

This study was supported by the Croatian Ministry of Science, Education and Sports, grants No. 022-0222148-2125, 277-27770966-0962 and 098-0982904-2954.

REFERENCES

[1] Cook JV, Kyriou JC, Pettet A, Fitzgerald MC, Pablot SM. Key factors in the optimization of paediatric X-ray practice. Br J Radiol 2001;74:1032-1040.

[2] Schneider K, Seidenbusch MC. Radiation exposure of children in pediatric radiology. Rofo 2010;182:479-492.

[3] Alt CD, Engelmann D, Schenk JP, Troeger J. Quality control of thoracic X-rays in children in diagnostic centers with and without pediatric-radiologic competence. Rofo 2006;178:191-199.

[4] Hammer GP, Seidenbusch MC, Schneider K, Regulla DF, Zeeb H, Spix C, Blettner M. A cohort study of childhood cancer incidence after postnatal diagnostic X-ray exposure. Radiat Res 2009;171:504-512.

[5] Andreasi MG, Ait-Ali L, Botto N, Manfredi S, Mottola G, Picano E. Cardiac catheterization and long-term chromosomal damage in children with congenital heart disease. Eur Heart J 2006;27:2703-2708.

[6] Lavin MF, Shiloh Y. Ataxia-telangiectasia: a multifaceted genetic disorder associated with defective signal transduction. Curr Opin Immunol 1996;8:459-464.

[7] Sankaranarayanan K. Estimation of the genetic risks of exposure to ionizing radiation in humans: current status and emerging perspectives. J Radiat Res (Tokyo) 2006;47:B57-66.

[8] Singh NP, McCoy MT, Tice RR, Schneider LL. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. Exp Cell Res 1988;175:184-191.

[9] Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus assay evolves into a "cytome" assay of chromosomal instability, mitotic dysfunction and cell death. Mutat Res 2006;600:58-66.

[10] Simpson AK, Whang PG, Jonisch A, Haims A, Grauer JN. The radiation exposure associated with cervical and lumbar spine radiographs. J Spinal Disord Tech 2008;21:409-412.

UTJECAJ RADIOIZOTOPA ^{201}Tl I ^{99m}Tc PRIMIJENJENIH U DIJAGNOSTIČKE SVRHE NA RAZINU OŠTEĆENJA GENOMA U LIMFOCITIMA PERIFERNE KRVI – PRIKAZ SLUČAJA

Nevenka Kopjar[1], Snježana Ramić[2], Davor Želježić[1] i Ivica Prlić[1]
[1]Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
[2]Klinika za tumore, Zagreb
nkopjar@imi.hr

UVOD

Radioizotopi ^{201}Tl i ^{99m}Tc primjenjuju se u okviru dijagnostičkih slikovnih tehnika u nuklearnoj medicini. Vrijeme poluživota ^{201}Tl je 73 h, a emitira energiju fotona od 69 keV, 71 keV i 80 keV, za razliku od ^{99m}Tc koji ima značajno kraće vrijeme poluživota od 6,02 h i emitira gama zrake energije 140 keV [1,2]. Radioaktivni obilježivači koji se rabe u nuklearnoj medicini moraju se određeno vrijeme nakon primjene zadržati u organizmu kako bi se moglo provesti snimanje. Nakon što dospiju u organizam, radioizotopi podliježu radioaktivnom raspadu emitirajući gama-zrake i beta-čestice u okolno tkivo. Pritom u staničnim makromolekulama mogu nastati izravna i/ili neizravna oštećenja, posredovana reaktivnim slobodnim radikalima koji se stvaraju tijekom radiolize vode. Razine primarnih oštećenja nastalih pod utjecajem zračenja umnogome ovise o biokemijskim značajkama tkiva, a posebice koncentracijama molekula koje služe kao ″hvatači″ slobodnih radikala, kao i funkcionalnosti enzimskih sustava koji sudjeluju u zaštiti stanice [3]. Najvažnije vrste oštećenja koje ionizirajuće zračenje uzrokuje u molekuli DNA su jedno- i dvolančani lomovi, modifikacije baza, povezivanja unutar i između lanaca te mjesta s višestrukim oštećenjima [3,4]. Pogrešno popravljeni lomovi u DNA mogu dovesti do nastanka kromosomskih aberacija, mutacija gena i zloćudne preobrazbe, dok nepopravljena primarna oštećenja DNA mogu uzrokovati i smrt stanice [3]. Oštećenja genoma nastala pod utjecajem ionizirajućeg zračenja najčešće se procjenjuju primjenom tri metode: komet-test, služi za otkrivanje primarnih oštećenja i/ili popravka u molekuli DNA [4,5]; analiza kromosomskih aberacija (CA), otkriva oštećenja strukture i/ili promjene broja kromosoma [6], dok mikronukleus-test (MN), otkriva gubitak dijelova ili čitavih kromosoma te poremećaje u strukturi i/ili funkciji diobenog vretena [5,7].

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi stupanj oštećenja genoma u leukocitima periferne krvi ispitanika koji je u kratkom vremenskom razdoblju bio podvrgnut dvjema nuklearno-medicinskim pretragama snimanja srca primjenom radioizotopa ^{201}Tl i ^{99m}Tc. Primarna oštećenja leukocitne DNA izmjerena su primjenom komet-testa u alkalnim uvjetima, a istovremeno je s pomoću analize CA i MN-testa istražena razina postojanih oštećenja u limfocitima i dinamika njihova uklanjanja u ovisnosti o vremenu proteklom nakon primjene radioizotopa.

MATERIJAL I METODE

Istraživanje je provedeno uz prethodnu suglasnost ispitanika muškog spola, dobi 49 g., nepušača. Zbog prirode posla, ispitanik je (tijekom 25 godina) povremeno izložen ionizirajućem i neionizirajućem zračenju te je, kao profesionalno izložena osoba, pod redovitom dozimetrijskom i biodozimetrijskom kontrolom. Tjedan dana prije prvog uzorkovanja krvi zbog zdravstvenih je problema ispitanik bio podvrgnut različitim dijagnostičkim pretragama, uključujući i rendgensko snimanje pluća pri čemu je korištena tzv. tvrda tehnika snimanja pluća. Vrlo prodorno i trajanjem vrlo kratko (puls do 0,5 s) rendgensko zračenje, filtrirano na vršni uski snop rendgenskog spektra ima vrlo slabo biološko međudjelovanje s tkivom. Daljnjom specijalističkom obradom postavljena je indikacija za snimanje srca primjenom radioizotopa talija i tehnecija. Za vrijeme prve pretrage, ispitanik je tijekom tjelesnog opterećenja sa 75 W jednokratno *i. v.* primio ^{201}Tl (aktivnost 111 MBq, što odgovara standardu za takav pregled osoba od 75 do 120 kg). Radionuklidna ventrikulografija učinjena je u mirovanju nakon *in vivo* obilježavanja vlastitih eritrocita tehnecijevim pirofosfatom. Tijekom te pretrage ispitanik je primio ^{99m}Tc aktivnosti od 740 MBq. Doze zračenja koje je ispitanik primio kroz svih 21 dan istraživanja mjerene su pomoću aktivnih elektroničkih i pasivnih film dozimetara.

Uzorkovanja periferne krvi provedena su: (I) 2 h prije prve dijagnostičke pretrage srca; (II) 60 min nakon *i. v.* primjene talija; (III) 14. dan nakon prve pretrage, a prije radionuklidne ventrikulografije s ^{99m}Tc; (IV) 60 min nakon *i. v.* primjene tehnecija; (V) 7 dana nakon radionuklidne ventrikulografije. Uzorci krvi ($V = 10$ mL po uzorkovanju) vađeni su iz kubitalne vene u sterilne heparinizirane spremnike. Odmah nakon vađenja krvi pristupilo se izradi mikrogelova za komet-test u alkalnim uvjetima [8], a zatim su u skladu sa standardnim protokolima uspostavljene stanične

kulture za uzgoj limfocita u uvjetima *in vitro* za analizu CA [6] i MN-test [9]. Pokus je napravljen u triplikatu.

Mjerenja kometa provedena su na fluorescencijskom mikroskopu (Leitz Wetzlar, Njemačka) pod povećanjem 250× pomoću računalnog programa Comet Assay II (Perceptive Instruments Ltd., UK). U svakom je uzorku izmjereno 300 kometa. Mjereni su dužina repa (izražena u μm) i % DNA u repu kometa. Analize CA i MN provedene su na svjetlosnom mikroskopu pod povećanjem 1000×. Ukupan broj CA i njihova raspodjela utvrđeni su pregledom ukupno 600 (3 × 200) metafaza prve *in vitro* diobe, a rezultati su prikazani kao srednje vrijednosti ± SD na 200 metafaza. Za potrebe MN-testa, pregledano je 3000 (3 × 1000) binuklearnih limfocita u kojima je utvrđen ukupni broj MN i njihova raspodjela u stanicama, a bilježena je i učestalost pupova na limfocitnim jezgrama (NB, od engl. *nuclear bud*), mostova između jezgara (NPB, od engl. *nucleoplasmic bridges*) te pojavnost apoptoza [7]. Rezultati su prikazani kao srednje vrijednosti ± SD na 1000 binuklearnih limfocita.

Svi su podaci obrađeni primjenom odgovarajućih matematičkih i statističkih metoda (deskriptivna statistika, jednosmjerna analiza varijance uz Schefféov post-test, χ^2-test i Fisherov test). Razina statističke značajnosti bila je $P < 0,05$.

REZULTATI I RASPRAVA

Rezultati komet-testa prikazani su na Slici 1 i u Tablici 1. Razina primarnih oštećenja DNA bila je najviša u I. uzorku krvi, izvađenom prije primjene ^{201}Tl. Vrijednosti oba promatrana parametra komet-testa izmjerene u tom uzorku odstupaju u odnosu na sva ostala uzorkovanja ($P < 0,001$; ANOVA uz Schefféov post-test).

Najnižu razinu primarnih oštećenja leukocitne DNA izmjerili smo u III. uzorku izvađenom 14. dan nakon prve pretrage, a prije ponovne *i. v.* primjene radionuklida. Nakon pretrage s ^{99m}Tc razina primarnih oštećenja leukocitne DNA ponovno je porasla (IV), što se nastavilo do zadnjeg uzorkovanja (V). Međutim, vrijednosti oba promatrana parametra komet-testa izmjerene u tom uzorku još uvijek su bile niže u odnosu na I. uzorak, što je u slučaju % DNA bilo i statistički značajno (Slika 1, Tablica 1). Prijašnja istraživanja također upućuju na osjetljivost komet-testa u otkrivanju primarnih oštećenja DNA izazvanih pod utjecajem radioizotopa u eksperimentalnim i *in vivo* uvjetima [10-12].

Slika 1. Primarna oštećenja DNA utvrđena primjenom komet-testa u leukocitima periferne krvi uzimanim od ispitanika u različitim vremenskim razdobljima prije i nakon primjene radioizotopa ^{201}Tl i ^{99m}Tc u dijagnostičke svrhe.

Prikazani su medijani i rasponi izmjerenih vrijednosti. Uzorkovanja krvi provedena su: (I) 2 h prije prve dijagnostičke pretrage srca; (II) 60 min nakon *i. v.* primjene ^{201}Tl; (III) 14. dan nakon prve pretrage, a prije radionuklidne ventrikulografije s ^{99m}Tc; (IV) 60 min nakon *i. v.* primjene ^{99m}Tc; (V) 7 dana nakon pretrage s ^{99m}Tc. Statistički značajno više vrijednosti: a – u odnosu na sve ostale uzorke; b – u odnosu na uzorke II, III i IV; c – u odnosu na uzorak III ($P < 0,05$; ANOVA uz Schefféov test).

Najveću učestalost CA u limfocitima utvrdili smo u II. uzorku krvi, što je u skladu s ranijim zapažanjima da ^{201}Tl ulazi u stanice slično monovalentnim kationima alkalijskih metala te da njegova unutarstanična lokalizacija pojačava štetne učinke na razini DNA [13]. Ukupni broj CA u limfocitima značajno se snizio između dviju pretraga. Broj CA ponovno je porastao nakon primjene ^{99m}Tc, ali su te vrijednosti bile niže nego nakon primjene ^{201}Tl, što se također slaže s literaturom [14,15]. Jedino su u IV. uzorku zabilježene četiri vrste CA, uključujući i bicentrične kromosome, koji su jedan od najvažnijih pokazatelja izloženosti ionizirajućem zračenju [6]. Zastupljenost ostalih vrsta CA, posebice porast broja kromosomskih lomova u uzorcima krvi uzimanima odmah nakon primjene radioizotopa, također je bila u skladu s prijašnjim studijama [14-16]. U zadnjem uzorkovanju učestalost CA bila je čak i niža nego prije primjene radioizotopa (Tablica 1), što upućuje na učinkovitost mehanizama popravka koji su uklonili nastala oštećenja u DNA, ali također i na mogućnost da su se ona uspješnije uklanjala zbog adaptivnog odgovora koji je ranije opisan u slučajevima ponavljane izloženosti ionizirajućem zračenju u kratkom vremenskom razdoblju [17,18].

Tablica 1. Rezultati komet-testa, analize CA i MN testa na uzorcima periferne krvi uzimanim prije i nakon dijagnostičke primjene radioizotopa ^{201}Tl i ^{99m}Tc. Prikazane su srednje vrijednosti ± SD, te rasponi izmjerenih vrijednosti.

Uzorak	I	II	III	IV	V
Komet-test / 300 kometa					
Dužina repa (μm)	14,57±1,97[a] 10,26–25,64	13,13±2,09 10,26–35,90	13,00±1,25 10,26–18,59	13,00±1,31 10,26–18,59	14,11±3,74[cde] 10,90–51,28
% DNA u repu	2,06±3,24[a] 0–19,73	1,00±1,69[d] 0–14,31	0,61±1,23 0–8,33	1,25±1,71[d] 0–16,69	1,25±2,48[d] 0–20,46
Analiza strukturnih kromosomskih aberacija (CA) / 200 metafaza					
Σ CA	1,67±0,58 1–2	5,33±1,53[adf] 4–7	1,00±0,00 1–1	3,00±2,65 1–6	1,33±0,58 1–2
Σ L_1	1,00±1,00 0–2	4,33±1,53[def] 3–6	–	0,33±0,58 0–1	–
Σ L_2	–	1,00±1,00 0–2	0,33±0,58 0–1	0,67±1,15 0–2	–
Σ AF	0,67±1,15[c] 0–2	–	0,67±0,58[c] 0–1	1,00±1,00[c] 0–2	1,33±0,58[c] 1–2
Σ BC	–	–	–	1,00±1,00[c] 0–2	–
Mikronukleus (MN) test / 1000 binuklearnih limfocita					
Σ MN	10,00±2,00 8–12	17,00±1,73 15–18	26,00±6,24[a] 21–33	14,33±5,51 8–18	14,00±3,00 11–17
Σ St. s MN	8,67±2,08 7–11	12,67±2,89 11–16	19,00±3,61[a] 16–23	10,67±3,51 7–14	12,00±2,65 10–15
St. s 1 MN	7,67±2,08 6–10	9,67±3,79 7–14	13,33±1,53[a] 12–15	8,33±2,52 6–11	10,33±2,31 9–13
St. s 2 MN	0,67±0,58 0–1	1,67±0,58 1–2	4,33±2,89 1–6	1,00±1,00 0–2	1,33±0,58 1–2
St. s 3 MN	0,33±0,58 0–1	1,33±1,53 0–3	1,33±1,15 0–2	1,33±1,53 0–3	0,33±0,58 0–1
Σ NB	4,00±1,00 3–5	8,00±1,00[b] 7–9	8,00±2,65[b] 6–11	7,00±1,00 6–8	5,00±2,65 4–8
Σ NPB	0,67±0,58 0–1	3,67±0,58[bf] 3–4	1,33±0,58[f] 1–2	2,33±0,58[f] 2–3	–
Σ APO	0,33±0,58 0–1	1,67±1,15 1–3	2,00±0,00 2–2	1,67±0,58 1–2	1,00±1,00 0–2

Uzorkovanja krvi provedena su: (I) 2 h prije prve dijagnostičke pretrage srca; (II) 60 min nakon *i. v.* primjene ^{201}Tl; (III) 14. dan nakon prve pretrage, a prije radionuklidne ventrikulografije s ^{99m}Tc; (IV) 60 min nakon *i. v.* primjene ^{99m}Tc; (V) 7 dana nakon pretrage s ^{99m}Tc.

L_1 – kromatidni lom; L_2 – kromosomski lom; AF – acentrični fragment; BC – bicentrični kromosom; NB – jezgrin pup; NPB – nukleoplazmatski most; APO – apoptoza.

Statistička značajnost rezultata komet-testa ispitana je primjenom analize varijance uz Schefféov post-test, a rezultati analize CA i MN-testa testirani su pomoću χ^2 i Fischerovog testa, pri razini značajnosti $P < 0,05$. Statistički značajno više vrijednosti a - *vs* svi ostali uzorci; b – *vs* I, c – *vs* II; d – *vs* III; e - *vs* IV; f – *vs* V.

Najveći broj MN utvrdili smo u III. uzorku, što je povezano s mehanizmima nastanka MN. S obzirom da MN nastaju kao posljedica gubitka dijelova ili čitavih kromosoma, ne iznenađuje da je povećani broj CA, kakav je bio zamijećen u II. uzorku, rezultirao porastom broja MN između dviju pretraga. uzorku. Pad broja MN utvrđen u IV. uzorku vjerojatno je posljedica ugibanja limfocita koji nisu uspjeli popraviti oštećenja izazvana pod utjecajem oba radioizotopa, a stanice koje su ušle u diobu očito su imale učinkovitije mehanizme popravka oštećenja DNA, čime se ukupni broj MN smanjio u odnosu na prethodno uzorkovanje. Slična se razina oštećenja zadržala i u V. uzorku. Treba naglasiti da je u ovisnosti o primjeni radioizotopa rasla i učestalost apoptoza, pupova na limfocitnim jezgrama te stanica s 2 MN i 3 MN. Broj mostova (NPB) bio je najveći u uzorku izvađenom nakon *i. v.* primjene ^{201}Tl, a tek neznatno niži nakon primjene ^{99m}Tc. Prema literaturi, pojava NPB obično je u pozitivnoj korelaciji s većom učestalosti kromosomskih rearanžmana, primjerice bicentričnih kromosoma [19], a slično je uočeno i u ovom istraživanju.

ZAKLJUČAK

Uzastopna primjena ^{201}Tl i ^{99m}Tc u dijagnostičke svrhe nije izazvala značajna odstupanja u razinama primarnih oštećenja leukocitne DNA. Rezultati citogentičkih analiza potvrđuju da su se nastala oštećenja na razini kromosoma intenzivno popravljala za vrijeme rasta stanica u kulturi, a kao posljedica ne-popravljenih ili pogrešno popravljenih oštećenja, porastao je broj CA i MN u limfocitima u razdoblju između dviju pretraga, što je u skladu s podacima iz dosadašnjih istraživanja. S obzirom da je ispitanik već godinama profesionalno izložen niskim dozama ionizirajućeg (a povremeno i neionizirajućeg) zračenja, smatramo da je važnu ulogu u staničnom odgovoru na visoke doze zračenja primljene za vrijeme pretraga imao adaptivni odgovor.

LITERATURA

[1] Kara P, Dagdeviren K, Özsözan M. Electrochemical DNA Biosensor for the Detection of DNA Damage Caused by Radioactive Iodine and Technetium. Turk J Chem 2007;31:243-249.

[2] McGoron AJ. Radioisotopes in Nuclear Medicine. Dostupno na: http://www.launc.tased.edu.au/online/sciences/PhysSci/radres/Radfiles/s7mcg.pdf

[3] Hosseinimehr SJ. Potential utility of radioprotective agents in the practice of nuclear medicine. Cancer Biother Radiopharm 2009;24:723-731.

[4] Olive PL Applications of the comet assay in radiobiology. Int J Radiat Biol 1999;75:395-405.

[5] Albertini RJ, Anderson D, Douglas GR, Hagmar L, Hemminki K, Merlo F, Natarajan AT, Norppa H, Shuker DEG, Tice R, Waters MD, Aitio A. IPCS guidelines for the monitoring of genotoxic effects of carcinogens in humans. Mutat Res 2000;463:111-172.

[6] International Atomic Energy Agency (IAEA). Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment. International Atomic Agency Technical Report Series No. 405. Vienna: IAEA; 2001.

[7] Fenech M, Chang WP, Kirsch-Volders M, Holland N, Bonassi S, Zeiger E. HUMN project: detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. Mutat Res 2003;534:65-75.

[8] Singh NP, McCoy MT, Tice RR, Schneider LL. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. Exp Cell Res 1988;175:184-191.

[9] Fenech M, Morley AA. Measurement of micronuclei in lymphocytes. Mutat Res 1985; 147:29-36.

[10] Gutierrez S, Carbonell E, Galofre P, Creus A, Marcos R. Application of the single cell gel electrophoresis(SCGE) assay to the detection of DNA damage induced by ^{131}I treatment in hyperthyroidism patients. Mutagenesis 1998;13:95-98.

[11] Pedraza-López M, Ferro-Flores G, Mendiola-Cruz MT, Morales-Ramírez P. Assessment of radiation-induced DNA damage caused by the incorporation of 99mTc-radiopharmaceuticals in murine lymphocytes using single cell gel electrophoresis. Mutat Res 2000;465:139-144.

[12] Kopjar N, Garaj-Vrhovac V. Assessment of DNA damage in nuclear medicine personnel – comparative study with the alkaline comet assay and the chromosome aberration test. Int J Hyg Environ Health 2005;208:179-191.

[13] Kassis AI, Adelstein SJ, Haydock C, Sastry KSR. Thallium-201: An Experimental and a theoretical radiobiological approach to dosimetry. J Nucl Med 1983;24:1164-1175.

[14] Taibi N, Aka P, Kirsch-Volders M, Bourgeois P, Frühling J, Szpireer C. Radiobiological effect of 99mTechnetium-MIBI in human peripheral blood lymphocytes: *Ex vivo* study using micronucleus/FISH assay. Cancer Lett 200620;23:68-78.

[15] Hosseinimehr SJ, Ahmadi A, Beiki D, Mahmoudzadeh A, Babaei M, Habibi E. The radiotracer 99mTc-MIBI is not genotoxic for human peripheral blood lymphocytes at diagnostic radioactive dose. Genet Mol Res 2009;8:923-928.

[16] Asli IN, Mosaffa N, Mogharrabi M, Hooman A, Tabei F, Javadi H, Shafei B, Seyedabadi M, Assadi M. Chromosome aberrations after high-dose ^{131}I and ^{99m}Tc-MIBI administration using a micronucleus assay. Nucl Med Commun. 2010;31:307-310.

[17] Wolf S. The adaptive response in radiobiology: Evolving insights and implications. Environ Health Perspect 1998;106(Suppl 1):277-283.

[18] Morgan WF, Sowa MB. Effects of ionizing radiation on nonirradiated cells. PNAS 2005;102:14127-14128.

[19] Fenech M, Crott JW. Micronuclei, nucleoplasmic bridges and nuclear buds induced in folic acid deficient human lymphocytes-evidence for breakage-fusion-bridge cycles in the cytokinesis-block micronucleus assay. Mutat Res 2002;504:131-136.

PERIPHERAL BLOOD LYMPHOCYTE GENOME DAMAGE INDUCED BY DIAGNOSTIC EXPOSURE TO ^{201}Tl AND ^{99m}Tc: A CASE STUDY

Nevenka Kopjar[1], Snježana Ramić[2], Davor Želježić[1] and Ivica Prlić[1]
[1]Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
[2]University Hospital for Tumors, Zagreb, Croatia
nkopjar@imi.hr

The levels of genome damage induced by diagnostic exposure to radioisotopes ^{201}Tl and ^{99m}Tc were studied in human peripheral blood leukocytes using the alkaline comet assay, the analysis of structural chromosome aberrations (CA) and cytokinesis-block micronucleus (MN) assay. A subject of study was an engineer occupationally exposed to ionising and nonionising radiation for about 25 years. Due to health problems, he has been advised to perform two nuclear medicine cardiac imaging procedures. In the first one he was given ^{201}Tl (activity 111 MBq), while second procedure involved the exposure to ^{99m}Tc (activity 740 MBq). In the course of study (21 day) radiation doses were monitored using both active electronic, and passive film badge dosimeters. Venous blood was collected before and after administration of ^{201}Tl, before and after administration of ^{99m}Tc, and 7 days after second cardiac imaging procedure. Although the subject received two high radiation doses in a short time period, results of the alkaline comet assay suggest that the levels of primary DNA damage in leukocytes were not significantly impaired. The highest level of CA was found in the blood sample collected after administration of ^{201}Tl, and moderate levels after administration of ^{99m}Tc. The highest incidence of MN was observed in 3rd blood sample collected before administration of ^{99m}Tc, which was in line with the mechanisms of MN formation following exposure to ionising radiation. Low levels of primary DNA damage observed in the course of study, along with low levels of CA and MN found in 5th blood sample point to effective repair mechanisms but also suggest the existence of an adaptive response in a subject, possibly induced by his long-term occupational exposure to low doses of both ionising and nonionising radiation.

OCCUPATIONAL EXPOSURE IN NUCLEAR MEDICINE – A CASE STUDY

Boban Rakić[1], Jelena Pajić[1], Olivera Marinković[2], Dubravka Jovičić[3], Vedrana Prokić[1] and Zoran Mirkov[1]

[1]Serbian Institute of Occupational Health, Belgrade, Serbia
[2]Serbian Radiation protection and Nuclear Safety Agency, Belgrade, Serbia
[3]Faculty of Applied Ecology "Singidunum" University, Belgrade, Serbia
rakicboban@yahoo.co.uk

INTRODUCTION

Ionising radiation is, at all phases of cell cycle, very efficient inducer of chromosome aberrations (CA) [1]. Most important cytogenetic tests used in assessment of genome damage are analysis of structural CA (stable and unstable), sister chromatid exchange (SCE) analysis and cytokinesis-block micronucleus (CBMN) assay [2-5].

CA analysis and CBMN assay are standardized techniques used in dose assessment of subjects professionally, medically and accidentally exposed to ionising radiation [5-8]. Unstable CA are product of complex interaction of ionising radiation and genome. Micronuclei are formed from acentric chromosome or chromatid fragments and whole chromosomes or chromatids that lag behind in anaphase and are left outside the daughter nuclei in telophase [9]. CBMN assay is nowdays implemented in dose assessment in persons operating both open and indoor sources of ionising radiation. It is simpler and faster than CA analysis, and examining more cells (1000 compared to 100 to 200 cells in CA analysis) achieves higher statistical significance [10].

Internal contamination by radionuclides represents special form of prolonged irradiation, in case of which irradiation of particular organs in the body is highly uncertain. Radionuclides can distribute uniformly (^{137}Cs and ^{3}H) or non-uniformly (^{90}Sr, ^{131}I) throughout human body. In case of uniform distribution biological dosimetry is successful [5].

Fifty personal dosimeters of workers in Nuclear Medicine Department (NMD) were processed in December 2007 in Laboratory for personal dosimetry (Radiation Protection Center of Serbian Institute of Occupational Health "Dr Dragomir Karajovic" – SIOH) and, at that point, unusual values

for two technicians were noticed. Those technicians than were examined in Cytogenetic laboratory of same Institute.

In this paper we presented values for personal equivalent doses *Hp(10)* and *Hp(0.07)* (from Personal Dosimetry Department - SIOH) and results of CA and CBMN analyses after first and control examinations from our Cytogenetic Laboratory.

MATERIAL AND METHODS

The personal dosimetry system consists of Harshaw TLD Reader Model 6600 and dosimeters. Thermoluminescent material are crystals LiF:Mg,Ti packed in standard holders which has two filters: tissue and skin equivalent.

Blood samples used in this study were taken from two technicians, non-smokers with 20 (technician 1) and 18 (technician 2) years of occupational exposure.

Structural CA in peripheral blood lymphocytes were analysed according to a standard protocol [4]. Two hundred well-spread metaphases per subject were screened for chromosome damage.

For CBMN assay lymphocytes were cultivated with the same routine procedure as for the classical cytogenetic analysis with addition of Cytochalasin B after 44th h of incubation [11].

RESULTS

Fifty personal dosimeters of workers in NMD were processed in December 2007 in Laboratory for personal dosimetry. Unusual results appeared only for two technicians. Difference between two personal dose equivalents indicated presence of high activity beta emitter. Other options (reading errors, dosimeter contamination, etc.) have been checked and eliminated.

It was quite clear that the NMD started with high activity ^{90}Y therapy. In official report from SIOH, NMD was warned to stop working without proper protection equipment, and they agreed. However, ^{90}Y therapy was repeated in February 2008 in the same conditions, again without proper protection equipment. Table 1 represents results for the same two technicians. NMD had own reasons to select same technicians for ^{90}Y application. Upon receiving the report, NMD agreed that therapy without protection measures must be discontinued because of increased risk involved.

Table 1. Personal dose equivalent for 11/2007 and 02/2008

Worker	Personal dose equivalent	November 2007		February 2008	
		barcode	Dose (mSv)	barcode	Dose (mSv)
1.	*Hp(10)*	658 (ii)	0.37	6938 (ii)	28.9
	Hp(0.07)	658 (iii)	9.70	6938 (iii)	**1452 !!!**
2.	*Hp(10)*	6405 (ii)	0.25	10542 (ii)	0.42
	Hp(0.07)	6405 (iii)	5.90	10542 (ii)	5.2

Explanation given by technician consisted information that unshielded syringe with ^{90}Y was warn in hand close to technician's body and personal dosimeter while walking from place of extraction to application room. That means also that *Hp(10)* = 28.9 mSv represent equivalent dose for small region near dosimeter, not for the whole body. Laboratory for personal dosimetry did cold reconstruction (without radionuclide), analyzed whole process and estimated that contact of worker fingers with unshielded syringe lasted about 1 minute per patient. Average activity in syringe was 3 GBq. Calculated finger skin dose at contact point was 2 Sv per one patient [12]. Laboratory estimated, from written data, that each technician administrated not less than 10 ^{90}Y therapy doses of 3 GBq from October 2007 to May 2008.

Results of cytogenetic analyses

Technician 1 (T1) was examined in Cytogenetic laboratory in January 2008. CA analysis showed 1 acentric fragment (ACF) per 200 examined metaphases, but micronuclei finding was interesting. We found 40 MN per 1000 examined binucleated lymphocytes (BN). Distribution of those 40 MN was non-uniform. There were 2 cells containing 4 MN, 4 cells containing 3 MN, 6 cells containing 2 MN and 8 cells with one MN. After this examination, T1 continued working in NMD with radionuclides, and when she came for control examinations in Cytogenetic laboratory, after 4 months (in May 2008) the results were: CA analysis showed 1 ACF and one chromatid break (CB), MN analysis: 37 MN per 1000 BN cells. We found 1 cell with 4 MN, 4 cells with 3 MN, 3 cells with 2 MN and 15 cells with one MN. After these examinations, T1 was excluded from working with radiopharmaceuticals for 3 months period. She came in Cytogenetic laboratory again in November 2008 and CA analysis showed normal

finding, without unstable structural chromosomal aberrations, chromatid and isochromatid breaks. There were 19 MN per 1000 BN cells.

Technician 2 (T2) was examined in cytogenetic laboratory only in November 2008. Both CA analysis and MN test showed normal values. There were no CAs and number of MN was 11 per 1000 examined BN cells.

Regarding risk assessment for the T1 it very important to say that she already had an accident in 2001 when she spilt ^{131}I over hands. The accident had not been announced and any dose estimation was not done. The first read-out of personal dosimeter after accident happened two weeks later. Result was *Hp(10)* = 11 mSv. Next month result has been *Hp(10)* = 7 mSv. Contaminated technician was irradiating her own personal dosimeter. Besides personal dosimetry results here we also report the values of biological indicators estimated after irradiation in year 2001. This technician was subjected to cytogenetic examinations in December 2001, and CA analysis showed one dicentric chromosome (DC) with accompanying ACF per 200 examined metaphase cells, while MN results were 35 MN per 1000 BN cells. Distribution of MN was following: 2 cells contained 3 MN, 3 cells contained 3 MN, 4 cells contained 2 MN, and 13 cells contained 1 MN.

CONCLUSION

Without measurement of finger doses it is impossible to verify occupational doses. However, this case report showed that, in certain situations, even TL dosimetry is sufficient for dose assessment and radiation accident detection. Case report for T1 is very good example of matching results of physical dosimetry and cytogenetic analysis in case of accidental exposure and internal contamination with high doses of radionuclides, unlike exposure to low doses of ionising radiation, in case of which disagreement between results of physical and biodosimetry is often present. The choice of proper cytogenetic analysis in case of internal contamination depends on points of entry and metabolism of radionuclides. According to some researchers [1] MN test should be used rather than CA analysis, because of its increased sensitivity and applicability for different type of internal contamination. This paper also showed that CBMN assay is more sensitive technique in case of internal contamination than CA analysis. Differences between biological response to same type of internal contamination of those two technicians can be explained by individual variability, and, perhaps, by fact that T1 was already, 7 years before second

accident, contaminated with another radionuclide. Her second response was higher perhaps because of cumulative effect of ionising radiation both from the first accident and chronic exposure to radionuclides on her working place.

The most important conditions for better practice in nuclear medicine are using of adequate protection equipments, regular medical and cytogenetic monitoring and education of workers operating open sources of ionising radiation.

REFERENCES

[1] Joksić G. Citogenetski testovi u dijagnostici internih kontaminacija radionuklidima. Hem ind 2001;55:273-276.

[2] Jovičić D, Milačić S, Vukov TD, Rakić B, Stevanović M, Drakulić D, Rakić R, Bukvić N. Detection of premature segregation of centromeres in persons exposed to ionizing radiation. Health Phys 2010;98(5):717-727.

[3] Albertini RJ, Nicklas JA, O'Neill JP. Future research directions for evaluating human genetic and cancer risk from environmental exposures. Environ Health Persp 1996;104(Suppl 3):503-510.

[4] International Atomic Energy Agency (IAEA). Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment. International Atomic Agency Technical Report Series 405. Vienna: IAEA;2001.

[5] Ainsbury EA, Bakhanova E, Barquinero JF, Brai M, Chumak V, Correcher V, Darroudi F, Fattibene P, Gruel G, Guclu I, Horn S, Javorska A, Kulka U, Lindholm C, Lloyd D, Lango A, Marrale M, Monteiro Gil O, Oestreicher U, Pajic J, Rakic B, Romm H, Trompier F, Veronese I, Voisin P, Vral A, Whitehouse CA, Weiser A, Woda C, Wojcik A, Rothkamm K. Review of Retrospective Dosimetry Techniques for External Ionizing Radiation Exposures. Radiat Prot Dosym 2010;doi: 10.1093/rpd/ncq499

[6] International Commision on Radiological Units and Measurements. Retrospective Assesment of Exposure to Ionizing Radiation (Report 68). J ICRU 2002.

[7] Fenech M, Chang WP, Kirsch-Volders M, Holland N, Bonassi S, Zeiger E.HUMN project: detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. Mutat Res 2003;534:65-75.

[8] Jovičić D, Milačić S, Milić N, Bukvić N, Vukov TD. Chromosomal aberrations in subjects exposed to ionizing radiation. J Env Path Tox Onc 2009;28:75-82.

[9] Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus technique: a detailed description of the method and its application to genotoxicity studies in human population. Mutat Res 1993;285:35-44.

[10] Mateuca R, Lombaert N, Aka PV, Decodier I, Kirsch-Volders M. Chromosomal changes: induction, detection methods and applicability in human biomonitoring. Biochemie 2006;88:1515-1531.
[11] Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay. Nature Protocols 2007;2:1084-104.
[12] Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook. Radiation Protection Dosimetry 2002;98:1-168.

ABSTRACT

Chromosomal aberrations (CA) analysis and cytokinesis-block micronucleus (CBMN) test are standardised techniques used in dose assessment of subjects professionally, medically and accidentally exposed to ionising radiation. At this time, there is no best applicable method for dose assessment in case of internal contamination with radionuclides. Available bioassays are more or less sensitive, depending on particular irradiation. Existing physical methods for dose assessment of subjects operating open sources in most cases are not enough for accurate dose assessment, and there is a need for implementing additional methods, namely, extremity dosimetry. There is, very often, disagreement in dose assessment in physical and biodosimetry in case of exposure to low doses of IR. However, in certain situations, both bioassays and available physical dosimetry methods seem to be quite enough in detecting internal contamination. In this paper are presented values for personal equivalent doses *Hp(10)* and *Hp(0.07)* (from Personal Dosimetry Department – SIOH) and results of CA and MN analyses after first and control examinations from Cytogenetic Laboratory of same Institute. This paper also showed that CBMN test is more sensitive technique in case of internal contamination than CA analysis.

PROMJENE KONCENTRACIJE LECITINA U MOŽDANOM TKIVU ČOVJEKA KOD NEKIH NEURODEGENERATIVNIH STANJA

Atifa Ajanović[1], Emin Sofić[2], Milena Mihaljević[1], Danica Hasanbašić[1] i Dunja Rukavina[1]
[1]Veterinarski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, BIH
[2]Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo, BIH
atifaajanovic@yahoo.com

UVOD

U mozgu se, tijekom starenja razvijaju promjene u više molekularnih procesa, od kojih neki vode ka kognitivnom deficitu [1]. Osnovna promjena u starenju mozga uključuje povećanje upale i oksidativnog stresa (OS) i te smanjenje mitohondrijske funkcije [2,3]. Prema dosadašnjim spoznajama, teorija o starenju povezuje akumulaciju OS u živčanom tkivu s ubrzanim neurodegenerativnim promjenama i bolestima povezanim sa starenjem [4]. Oštećenje slobodnim radikalima (SR) implicirano je brojnim bolestima koje su povezane sa starenjem [5]. Znanstvena istraživanja dokazuju da SR doprinose svim oblicima Parkinsonove bolesti (PD) i senilne demencije Alzheimerovog tipa (SDAT) [6,7]. Kao posljedica mogućeg povećanja OS ili propadanja živčanih stanica tijekom starenja, u nekim stanjima neurodegeneracije dokazane su raznovrsne biokemijske promjene, naročito manjak kolesterola i lecitina u moždanim regijama.

Cilj ovog rada je utvrditi promjene koncentracije lecitina u različitim regijama mozga (MC – *motor cortex*, NC – *nucleus caudates,* GT – *gyrus temporalis*) nastale pod utjecajem SDAT i PD. U tu svrhu postmortem su uzimani uzorci moždanog tkiva od oboljelih kao i osoba koje tijekom života nisu bolovale od neuroloških bolesti.

MATERIJAL I METODE

U ovome istraživanju korišteni su uzorci moždanog tkiva čovjeka uzimani postmortem. Ukupno je sakupljeno:

(1) 18 uzoraka moždanog tkiva od 12 umrlih osoba sa SDAT, prosječne starosne dobi (84,7 ± 7,7) godina. Postmortem vrijeme za skupinu SDAT iznosilo je (36,3 ± 24,6) h.

(2) 11 uzoraka moždanog tkiva od 8 umrlih osoba sa PD, starosne dobi od 75,3 godine, u rasponu od 66 do 86 godina. Postmortem vrijeme za skupinu PD je iznosilo (20,63 ± 1,95) h.

(3) 18 uzoraka moždanog tkiva 8 umrlih osoba koje nisu bolovale od neuroloških bolesti, prosječne starosne dobi od (71,3 ± 12,5) godina, u rasponu od 51 do 91 godina. Ti su uzorci služili kao kontrola. Postmortem vrijeme za kontrolnu skupinu iznosilo je (27,2 ± 18,8) h.

Za određivanje sadržaja lecitina u moždanom tkivu čovjeka korišteni su homogenati dobiveni usitnjavanjem biološkog uzorka na staničnom homogenizatoru (Model B-15 P), a od dobivenog homogenata načinjena su razrijeđenja s 0,9 %-tnom otopinom NaCl u omjeru 1:9. Sva mjerenja provedena su spektrofotometrijskim metodama na UV/VIS spektrofotometru (Perkin-Elmer Lambda 25). Koncentracija lecitina određena je enzimatskom metodom s pomoću komercijalnog kita (CHRONOLAB Systems, Španjolska) [8].

REZULTATI

U Tablici 1 prikazana je koncentracija lecitina (mg/g) kao i broj obrađenih uzoraka MC, NC i GT regija moždanog tkiva uzetog postmortem od osoba sa SDAT i PD te osoba bez neurodegenerativnih poremećaja (C).

Tablica 1. Koncentracija lecitina u moždanim regijama čovjeka

Uzorak	**Broj uzoraka**	**Lecitin** (mg/g) **± SD**
MC-C	10	21,6 ± 3,73a
NC-C	8	20,5 ± 2,47
GT-C	10	18,3 ± 1,79
MC-PD	2	18,2 ± 0,85
NC-PD	4	18,8 ± 0,64
GT-PD	5	16,4 ± 1,24
MC-SDAT	4	14,4 ± 0,85**
NC-SDAT	10	14,9 ± 2,52**b
GT-SDAT	9	13,1 ± 2,85**

Regije: MC-*motor cortex*, NC- *nucleus caudates,* GT- *gyrus temporalis*
Moždano tkivo uzimano je postmortem od osoba bez neurodegenerativnih poremećaja (skupina C); osoba s Parkinsonovom bolešću (skupina PD) te osoba sa senilnom demencijom Alzheimerovog tipa (skupina SDAT).
a = statistički značajna razlika ($p < 0,05$) između različitih regija moždanog tkiva iste skupine; ** = statistički značajna razlika ($p < 0,01$) između istih regija moždanog tkiva C sa skupinama PD i SDAT; b= statistički značajna razlika ($p < 0,01$) između istih regija moždanog tkiva skupina PD i SDAT

Najviša koncentracija lecitina nađena je u MC regiji kontrolne skupine sa statistički značajnom razlikom ($p < 0,05$) u odnosu na koncentraciju lecitina u NC i GT regijama iste skupine. Najniža koncentracija lecitina nađena je u MC (14,4 mg/g) i GT (13,1 mg/g) skupine SDAT, koja je bila i statistički značajno ($p < 0,01$) niža u odnosu na koncentraciju lecitina u tim regijama C skupine (21,6 mg/g u MC i 18,3 mg/g u GT).

Između različitih regija za skupinu SDAT, statistički značajna razlika nije utvrđena (Slika 1). U odnosu na kontrolnu skupinu, koncentracija lecitina u svim moždanim regijama skupine PD bila je niža, ali bez statistički značajne razlike (Slika 2). Nije utvrđena ni statistički značajna razlika u koncentraciji lecitina između različitih moždanih regija skupine PD. Između istih moždanih regija skupina PD i SDAT, statistički značajno niža koncentracija lecitina ($p < 0,01$) izmjerena je u NC regiji skupine SDAT (Slika 3).

Slika 1. Koncentracija lecitina (mg/g) u različitim regijama moždanog tkiva uzimanog postmortem osobama koje su bolovale od SDAT te osobama bez neurodegenerativnih poremećaja (C).

Slika 2. Koncentracija lecitina (mg/g) u različitim regijama moždanog tkiva uzimanog postmortem osobama koje su bolovale od PD te osobama bez neurodegenerativnih poremećaja (C).

Slika 3. Koncentracija lecitina (mg/g) u različitim regijama moždanog tkiva uzimanog postmortem osobama koje su bolovale od PD i SDAT.

RASPRAVA

Za razliku od drugih tkiva, mozak je posebno osjetljiv na OS [4]. Razlozi te osjetljivosti mogu biti prisustnost višestruko nezasićenih masnih kiselina, sklonih peroksidaciji i visoko lokaliziranih naslaga željeza u području *substantia nigra* (SN) i NC oboljelih od PD [9,10]. Zatim, povećana bazalna peroksidacija lipida može uzrokovati inhibiciju sinteze dopamina i oštećenje sustava za sintezu dopamina. U SN mozga oboljelih

od PD dokazan je i porast razine malonaldehida, koji izražava brzinu peroksidacije lipida [11]. Promjene u staničnom lipidnom putu mogu poremetiti i funkcije stanice.

Smanjenje razine fosfolipida za više od 40 %, kao i dramatično povećanje razine ceramida u humanom moždanom tkivu, specifično se manifestiraju u ranijem klinički prepoznatljivom stadiju SDAT [12]. Mjerenjem razina vodotopljivih metabolita fosfatdilkolina (PtdCho) u cerebrospinalnoj tekućini (CSF) utvrđeno je da su oboljeli od SDAT, u usporedbi s kontrolnom skupinom odgovarajuće starosne dobi, imali povišene razine cjelokupnih kolinskih metabolita i to: glicerofosfokolin (GPCh) za 76 % ($p < 0,01$), fosfokolin 52 % ($p < 0,05$) i slobodni kolin (Ch) 39 %. Promjene PtdCho vjerojatno su posredovane citosolnom fosfolipazom A_2 ($cPLA_2$) i mogu predstavljati dodatni biomarker u CSF [13]. Brojna su istraživanja ustanovila deficit aferentnih kortikalnih sustava koji kao načelni neurotransmiter koriste acetilkolin, dopamin, noradrenalin i serotonin. Naime, najprije je otkrivena redukcija acetilkolin-esteraze, a zatim i smanjenje aktivnosti kolin-acetiltransferaze u neokorteksu i hipokampusu bolesnika s uznapredovalom SDAT. Naši rezultati ukazuju da je koncentracija lecitina statistički značajno ($p < 0,01$) niža u analiziranim regijama moždanog tkiva osoba umrlih od SDAT i da je reducirana za oko 30 % u odnosu na kontrolu. U svim ispitivanim regijama moždanog tkiva za PD, koncentracija lecitina snižena je za oko 12 % u odnosu na kontrolu, ali bez statističke značajnosti. U hipokampusu koncentracija ukupnih lipida, triglicerida, lecitina i kolesterola je smanjena, a također je smanjena i aktivnost kisele fosfataze [14].

ZAKLJUČAK

Koncentracija lecitina u MC 14,4 mg/g svježeg tkiva (f.t.) i GT 13,1 mg/g (f.t.) za SDAT statistički su značajno sniženi ($p < 0,01$) u odnosu na kontrolu u koje je izmjereno: 21,6 mg/g (f.t.) u MC i 18,3 mg/g (f.t.) u GT. Dobiveni rezultati ukazuju da je koncentracija lecitina u ovim regijama moždanog tkiva kod SDAT smanjena za oko 30 %, kao posljedica propadanja živčanih stanica. U svim ispitivanim regijama moždanog tkiva kod PD, koncentracija lecitina snižena je oko 12 % u odnosu na kontrolnu skupinu, ali bez statističke značajnosti. Takva promjena koncentracije lecitina u moždanom tkivu može utjecati na promjene u sastavu membrane i na staničnu degeneraciju.

LITERATURA

[1] Kadish I, Thibault O, Blalock EM, Chen KC, Gant JC, Porter NM, Landfield PW. Hippocampal and Cognitive Aging across the Lifespan: A Bioenergetic Shift Precedes and Increased Cholesterol Trafficking Parallels Memory Impairment. J Neurosci 2009;29(6):1805-1816.

[2] Gibson GE, Karuppagounder SS, Shi Q. Oxidant-induced changes in mitochondria and calcium dynamics in the pathophysiology of Alzheimer's disease. Ann N Y Acad Sci 2008;1147:221-232.

[3] McGeer PL, McGeer EG. Inflammation and the degenerative diseases of aging. Ann N Y Acad Sci 2004;1035:104-116.

[4] Olanow CW. An introduction to the free radical hypotesis in Parkinson's disease. Ann Neurol 1992;32:S2-S9.

[5] Sofic E, Rustembegovic A, Kroyer G, Cao G. Serum antioxidant capacity in neurological, psychiatric, renal diseases and cardiomyopathy. J Neural Transm 2002;109:711-719.

[6] Jenner P, Olanow CW Oxidative stress and the pathogenesis of Parkinson's disease. Neurology 1996;47(6 Suppl 3):S161-170.

[7] Moreira PI, Siedlak SL, Aliev G, Zhu X, Cash AD, Smith MA, Perry G.Oxidative stress mechanisms and potential therapeutics in Alzheimer's disease. J Neural Transm 2005;12:921-923.

[8] Takayama M, Itoh S, Nagasaki T, Tanimizy I. A new enzymatic method for determination of serum choline-containing phospholipids. Clin Chim Acta 1977;79:93-98.

[9] Gerlach M, Double KL, Youdim MBH, Riderer P. Potential sources of increased iron in the substantia nigra of parkinsonian patients. J Neural Transm (Suppl)2006;70:133-142.

[10] Sofic E, Paulus W, Jellinger K, Riederer P, Youdim MBH. Selective increase of iron in substantia nigra zona compacta of parkinsonian brain. J Neurochem 1991;56:978-982.

[11] Dexter DT, Carter CJ, Wells FR, Javoy-Agid F, Agid Y, Lees A, Jennner P, Arsden CD. Basal lipid peroxidation in substantia nigra is increased in Parkinson' s disease. J Neurochem 1989;52:381-389.

[12] Han X. Lipid alterations in the earliest clinically recognizable stage of Alzheimer's disease: implication of the role lipids in the pathogenesis of Alzheimer's disease. Curr Alzheimer Res 2005;2(1):65-77.

[13] Walter A, Korth U, Hilgert M, Hartmann J, Weichel O, Hilgert M, Fassbender K, Schmitt A, Klein J. Glycerophosphocholine is elevated in cerebrospinal fluid of Alzheimer patients. Neurobiol Aging 2004;25(10):1299-1303.

[14] Sofic E, Frőlich L, Riederer P, Jellinger K, Heckers S, Beckmann H, Deinzer E, Pantucek F, Hebenstreit G, Ransmayr G. Biochemical membrane Constituents and Activities of Alkaline and Acid Phosphatase and Cathepsin in Cortical and Subcortical Brain Areas in Dementia of the Alzheimer Type. Dementia 1991;2:39- 44.

CHANGES IN LECITHIN CONCENTRATION IN THE HUMAN BRAIN TISSUE IN SOME NEURODEGENERATIVE CONDITIONS

Atifa Ajanović[1], Emin Sofić[2], Milena Mihaljević[1], Danica Hasanbašić[1] and Dunja Rukavina[1]
[1]Faculty of Veterinary Medicine, University of Sarajevo, Sarajevo, B&H
[2]Faculty of Science, University of Sarajevo, Sarajevo, B&H
atifaajanovic@yahoo.com

As a consequence of a possible increase in oxidative stress or deterioration of nerve cells during aging, in some states neurodegeneration was demonstrated by multiple biochemical deficiency, especially deficiency of cholesterol and lecithin in brain regions. The aim of this study was to determine the changes in the concentration of lecithin in different regions of brain tissue (MC – *motor cortex*, NC – *nucleus caudates*, GT – *temporal gyrus)* dissected postmortem from people with senile dementia of Alzheimer's type (SDAT), and persons with Parkinson's disease (PD) as compared to people who died without these diseases (C). Spectrophotometric determination of lecithin in 18 postmortem brain tissue regions collected from of 12 persons with SDAT, in 11 postmortem brain tissue regions of 8 persons with PD and in 18 postmortem brain tissue regions of 8 control persons, was performed by enzymatic method. The content of lecithin in MC: 14.4 mg/g fresh tissue (f.t.) and GT: 13.1 mg/g (f.t.) for SDAT was significantly reduced ($p < 0.01$) by about 30 %, compared to control where there was: 21.6 mg/g (f.t.) in MC and 18.3 mg/g (f.t.) in the GT estimated. In all regions of the brain of PD patients, the content of lecithin was decreased by about 12 % compared to control, but without statistical significance. These results suggest that changes in the content of lecithin in these regions of brain tissue might affect the changes in the membrane potential and cell degeneration.

KONCENTRACIJA BJELANČEVINA I BJELANČEVINSKIH FRAKCIJA U KRVNOJ PLAZMI PILIĆA IZLEŽENIH IZ JAJA OZRAČENIH MALOM DOZOM GAMA-ZRAČENJA

Petar Kraljević[1], Marinko Vilić[1], Danica Matišić[2], Saveta Miljanić[3] i Miljenko Šimpraga[1]
[1]Veterinarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
[2]Klinički bolnički centar Zagreb, Zagreb
[3]Institut Ruđer Bošković, Zagreb
kraljev@vef.hr

UVOD

U našem ranijem radu [1] pokazali smo da ozračivanje kokošjih jaja prije inkubacije dozom od 0,15 Gy γ-zračenja podstiče metabolizam u pilića izleženih iz tih jaja, što se očitovalo većim prirastom tijekom tova pilića i većom tjelesnom masom na kraju tova, tj. 42. dana života. Osim toga, u tih je pilića tijekom tova bila povećana aktivnost aspartat-aminotransferaze (AST) i alanin-aminotransferaze (ALT) u krvnoj plazmi. Budući da je zabilježen porast tjelesne mase u pilića izleženih iz jaja ozračenih malom dozom γ-zračenja prije inkubacije te porast aktivnosti aminonotransferaza u krvnoj plazmi istih pilića, može se pretpostaviti da je koncentracija ukupnih bjelančevina i bjelančevinskih frakcija u krvnoj plazmi tih pilića također povećana. Naime, dobro je poznato da aminotransferaze imaju važnu ulogu u metabolizmu bjelančevina jer kataliziraju prijenos amino-skupine s amino-kiseline na keto-kiselinu [2,3]. Stoga smo u ovome radu istražili učinak male doze γ-zračenja na koncentraciju ukupnih bjelančevina i bjelančevinskih frakcija u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih prije inkubacije, tijekom prvog tjedna života.

MATERIJAL I METODE

Pokuse smo načinili na pilićima hibridima tovne pasmine Gent (linija Cobb 500) oba spola, izleženim iz jaja ozračenih γ-zrakama prije inkubacije dozom od 0,15 Gy iz radioaktivnog izvora ^{60}Co panoramaskog tipa (pokusna skupina). Zajedno s pokusnom skupinom imali smo i kontrolnu skupinu pilića izleženu iz neozračenih jaja. Svi ostali uvjeti bili su isti za obje skupine pilića. Tijekom tova pilići su hranu i vodu uzimali *ad libitum*.

Piliće obje skupine odabrali smo nasumce, pa odnos spolova u pojedinoj skupini nismo utvrdili.

Krv za analizu uzimali smo iz srca 1. i 3. dana i iz krilne vene 5. i 7. dana života u epruvete s heparinom kao antikoagulansom. Punu krv centrifugirali smo na 3000 o/min.

Koncentraciju ukupnih bjelančevina određivali smo u skupnom uzorku krvne plazme od 10 pilića (tj. svaki pojedinačni uzorak bio je sabran od krvi deset pilića, a ukupno je bilo deset takvih skupnih uzoraka) biuret metodom na spektrofotometru RA-1000 (Technicon Instruments Corporation, Tarrytown, NY, SAD) koristeći gotove komplete reagencija proizvođača Boehringer Mannheim GmbH. Bjelančevinske frakcije određivali smo elektroforezom na trakicama geliranog celuloza aceteta (Glob-Al Scan denzitometar).

Rezultate smo statistički obradili i prikazali kao aritmetičku sredinu skupine (M) zajedno sa srednjom pogreškom srednje vrijednosti (SE), a značajnost među razlikama provjerili smo t-testom po Studentu [4].

REZULTATI

Rezultati koncentracije ukupnih bjelančevina u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih prije inkubacije i u krvnoj plazmi pilića izleženih iz neozračenih jaja prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Ukupne bjelančevine (g/L) u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih prije inkubacije dozom od 0,15 Gy γ-zračenja (pokusna skupina) i u krvnoj plazmi pilića izleženih iz neozračenih jaja (kontrolna skupina).

Skupina pilića (n = 10)	**Starost pilića (dani)**			
	1 (M ± SE)	**3 (M ± SE)**	**5 (M ± SE)**	**7 (M ± SE)**
Pokusna skupina	24,20 ± 0,83	26,40 ± 0,37*	25,80 ± 0,49	25,00 ± 0,21**
Kontrolna skupina	25,40 ± 1,00	28,00 ± 0,67	24,20 ± 0,49	28,20 ± 0,39

* $P < 0,05$; ** $P < 0,001$

Koncentracija ukupnih bjelančevina bila je značajno smanjena u krvnoj plazmi pilića izleženih iz ozračenih jaja 3. ($P < 0,05$) i 7. dana života ($P < 0,001$). Koncentracija bjelančevinskih frakcija, tj. albumina, α_1-globulina, α_2-globulina te β- i γ-globulina u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih prije inkubacije i u krvnoj plazmi pilića izleženih iz neozračenih jaja prikazana je u Tablici 2.

Tablica 2. Bjelančevinske frakcije (g/L) u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih prije inkubacije dozom od 0,15 Gy γ-zračenja (pokusna skupina) i u krvnoj plazmi pilića izleženih iz neozračenih jaja (kontrolna skupina).

Bjelančevinske frakcije	**Skupina pilića (n=10)**	**Starost pilića (dani)**			
		1 (M±SE)	**3 (M±SE)**	**5 (M±SE)**	**7 (M±SE)**
Albumini	Pokusna	12,17±0,47	14,32±0,27	14,39±0,45	14,49±0,27**
	Kontrolna	12,08±0,46	14,46±0,46	13,43±0,25	15,81±0,14
α_1 - globulini	Pokusna	2,05±0,11	1,97±0,15	1,92±0,32	1,55±0,08
	Kontrolna	2,27±0,15	2,84±0,44	1,17±0,14	1,64±0,18
α_2 - globulini	Pokusna	1,81±0,07*	2,10±0,08	2,12±0,20	2,02±0,10**
	Kontrolna	2,12±0,11	2,86±0,67	2,30±0,18	2,85±0,15
β- i γ - globulini	Pokusna	8,17±0,31	8,01±0,21	7,32±0,31	6,90±0,13*
	Kontrolna	8,92±0,41	7,84±0,76	6,49±0,59	7,90±0,26

* $P < 0,05$; ** $P < 0,001$

Koncentracija albumina u krvnoj plazmi pilića izleženih iz ozračenih jaja prije inkubacije bila je značajno smanjena 7. dana života ($P < 0,001$). Koncentracija α_2-globulina u krvnoj plazmi istih pilića bila je značajno smanjena 1. ($P < 0,05$) i 7. dana života ($P < 0,001$), a koncentracija β- i γ-globulina bila je smanjena u krvnoj plazmi pilića izleženih iz ozračenih jaja 7. dana života ($P < 0,05$).

RASPRAVA

Rezultati pokusa pokazali su da je koncentracija bjelančevina i bjelančevinskih frakcija u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih dozom od 0,15 Gy γ-zračenja prije inkubacije bila smanjena tijekom prvih sedam dana života.

Ovi rezultati razlikuju se od rezultata dobivenih u pokusima na istim pilićima koji se odnose na aktivnost AST i ALT u krvnoj plazmi tijekom prvih sedam dana života [1]. Naime, aktivnost ALT u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih dozom od 0,15 Gy γ-zračenja prije inkubacije nije se značajno mijenjala tijekom prvih sedam dana života, dok je aktivnost AST bila značajno povećana samo 3. dana života. Koji je pak razlog smanjenju koncentracije ukupnih bjelančevina i bjelančevinskih frakcija u krvnoj plazmi pilića izleženih iz jaja ozračenih prije inkubacije tijekom

prvog tjedna života, teško je pouzdano reći. Ipak, čini se da ozračivanje pilećih jaja malom dozom gama zračenja prije inkubacije djeluje inhibitorno na sintezu bjelančevina u pilića izleženih iz tih jaja.

Usporedimo li, međutim, koncentraciju ukupnih bjelančevina s koncentracijom bjelančevinskih frakcija u krvnoj plazmi istih pilića razabrat ćemo da je i koncentracija albumina i globulina također bila smanjena. Svakako da je ovo smanjenje koncentracije albumina i β- i γ-globulina moglo imati za posljedicu smanjenje ukupnih bjelančevina u krvnoj plazmi pilića tijekom prvog tjedna života, jer upravo te frakcije najviše pridonose koncentraciji ukupnih bjelančevina [5]. No, koji je pravi uzrok hipoalbuminemiji, tj. padu koncentracije albumina u krvnoj plazmi pokusnih pilića tijekom trećeg dana (doduše to smanjenje nije bilo statistički značajno) i 7. dana pokusa, u ovom je trenutku teško reći. Može se prepostaviti da je to posljedica inhibicijskog učinka male doze zračenja na, ponajprije, stanice jetre, ali i na stanice retikulo-endotelnog sustava. Ovu pretpostavku temeljimo na rezultatima Brandta i sur. [6], Heima i Schechtmana [7], Vanstonea i sur. [8], Sturkia [5] i Chena i sur. [9] koji su pokazali da jetra, koliko god bila morfološki razvijena u prvome tjednu embrionalnoga razvoja, ne uspostavlja u cijelosti svoju funkciju sve do desetoga dana embrionalnoga razvoja. Stoga se ne može isključiti ni mogućnost da ozračivanje jaja na početku embrionalnog razvoja nije utjecalo na funkciju jetre u prvome tjednu života pilića u smislu smanjenja njezine anaboličke aktivnosti.

ZAKLJUČAK

Ozračivanje kokošjih jaja dozom od 0,15 Gy γ-zračenja prije inkubacije, uzrokuje pad koncentracije bjelančevina i bjelančevinskih frakcija u krvnoj plazmi pilića izleženih iz tih jaja tijekom prvoga tjedna života. Zabilježeno smanjenje koncentracije bjelančevina i bjelančevinskih frakcija u prvome tjednu života, moguće je posljedica inhibicijskog učinka korištene doze γ-zračenja prije inkubacije na anaboličku aktivnost stanica jetre, ali i retikulo-endotelnog sustava u ranoj fazi života pilića.

Zahvala

Rad je izrađen uz novčanu potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

LITERATURA

[1] Kraljević P, Vilić M, Miljanić S, Šimpraga M. Body weight and enzymes activities in blood plasma of chickens hatched from eggs irradiated with low level gamma rays before incubation. Acta Vet (Beograd) 2009;59:503-511.

[2] Coles HE.Veterinary Clinical Pathology. 3th edition. Philadelphia-London-Toronto, Saunders Company, 1990. ISBN 0-7216-2644-0.

[3] Guyton CA, Hall TE. Textbook of Medical Physiology. 11th edition. Phyladelphya, Elsevier Saunders, 2006. ISBN 0-7216-0240-1.

[4] Renner E. Mathematisch-statistische Methoden in der praktischen Anwendung. Berlin-Hamburg, Verlag Paul Perey, 1970;34-36.

[5] Sturkie PD, Avian Physiology. 5th edition. San Diego, Boston, New York; Sudney, Tokyo, Toronto, Academic Press, 2000. ISBN 0-12-747605-9.

[6] Brandt LW, Clegg R.E., Andrews A.C. The effect of age and degree of maturity on the serum proteins of the chicken. J Biol Chem;1951;191:105-111.

[7] Heim WG, Schechtman AM. Electrophoretic analysis of the serum of the chickens during development. J Biol Chem 1954;209:241-247.

[8] Vanstone WE, Maw WA, Common RH. Levels and partition of the fowl's serum proteins in relation to age and egg production. Can J Biochem Physiol 1955;33:891-903.

[9] Chen S, Cai L, Li X, Liu SZ. Low-dose whole-body irradiation induces alteration of protein expression in mouse splenocytes. Toxicol Lett 1999;105:141-152.

CONCENTRATION OF PROTEINS AND PROTEIN FRACTIONS IN BLOOD PLASMA OF CHICKENS HATCHED FROM EGGS IRRADIATED WITH LOW LEVEL GAMMA RAYS

Petar Kraljević[1], Marinko Vilić[1], Danica Matišić[2], Saveta Miljanić[3] and Miljenko Šimpraga[1]
[1]Faculty of Veterinary Medicine, University of Zagreb, Zagreb, Croatia
[2]University Hospital Centre Zagreb, Zagreb, Croatia
[3]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
kraljev@vef.hr

In literature there are many results which have shown that low dose radiation can stimulate many physiological processes of living organism. In our earlier paper it was shown that low dose of gamma radiation has a stimulative effect upon metabolic process in chickens hatched from eggs irradiated before incubation. This was proved by increase of body weight gain and body weight, as well as by increase of two enzymes activities in blood plasma (aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase) which play an important role in protein metabolism. Therefore, an attempt was made to determine the effect of eggs irradiation by low dose gamma rays upon concentration of total proteins and protein fractions in the blood plasma of chickens hatched from irradiated eggs. The eggs of heavy breed chickens were irradiated with a dose of 0.15 Gy gamma radiation (^{60}Co) before incubation. Along with the chickens which were hatched from irradiated eggs, there was a control group of chickens hatched from nonirradiated eggs. All other conditions were the same for both groups of chickens. Blood samples were taken from the right jugular vein on the 1st and 3rd day, or from the wing vein on days 5 and 7 after hatching. The total proteins concentration in the blood plasma was determined by the biuret method using Boehringer Mannheim GmbH optimized kits. The protein fractions (albumin, α_1-globulin, α_2-globulin, β- and γ-globulins) were estimated electrophoretically on Cellogel strips. The total proteins concentration was significantly decreased in blood plasma of chickens hatched from irradiated eggs on days 3 ($P < 0.05$) and 7 ($P < 0.001$). The albumin concentration in the blood plasma of chickens hatched from irradiated eggs was significantly decreased on the 7th day ($P < 0.001$), and the concentration of α_2-globulin was decreased on days 1 ($P < 0.05$) and 7 ($P < 0.001$). Beta- and γ-globulins concentration was significantly decreased on the 7th day of life. Obtained results indicate that low dose of gamma radiation has mostly inhibitory effect upon concentration of total proteins and protein fractions in the blood plasma of chickens hatched from irradiated eggs before incubation.

UČINAK MALIH DOZA GAMA-ZRAČENJA NA TITAR PROTUTIJELA ZA VIRUS NEWCASTLESKE BOLESTI U PILIĆA LAKE PASMINE

Marinko Vilić[1], Željko Gottstein[1], Saveta Miljanić[2], Hrvoje Mazija[1] i Petar Kraljević[1]
[1]Veterinarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
[2]Institut Ruđer Bošković, Zagreb
marinko.vilic@vef.hr

UVOD

Male doze ionizirajućeg zračenja mogu stimulirati humoralnu i staničnu imunost. O tome svjedoče mnogobrojni rezultati, uglavnom pokusa načinjenih na sisavcima [1-5]. Općenito, podaci o učincima malim doza gama-zračenja u peradi su oskudni, a napose su oskudni podaci o učincima malih doza ionizirajućeg zračenja na imunosni sustav ptica. Rezultati našeg ranijeg istraživanja u kokoši [6] pokazali su da ozračivanje kokošijih jaja prije inkubacije i ozračivanje kokošijih zametaka 19. dana inkubacije dozom od 0,3 Gy gama-zračenja stimulira humoralnu imunost.

U ovom radu istražili smo titar protutijela za virus newcastleske bolesti u krvnom serumu pilića ozračenih prvog dana nakon valjenja akutnom dozom od 0,15 Gy, 0,30 Gy i 0,5 Gy gama-zračenja.

MATERIJAL I METODE

Muške piliće lake pasmine ozračili smo prvog dana, neposredno nakon leženja, dozom od 0,15, 0,30 i 0,50 Gy gama-zračenja iz radioaktivnog izvora ^{60}Co panoramskog tipa pri brzini doze od 0,0117 Gy/s. Zajedno s pokusnom skupinom pilića držali smo i kontrolnu skupinu koja nije bila ozračena. Svi ostali uvjeti bili su isti za obje skupine pilića. Piliće pokusne i kontrolne skupine cijepili smo komercijalnim cjepivom (PESTIKAL ® La Sota SPF, VETERINA d.o.o., Zagreb, Croatia) postupkom nebulizacije tri sata i 14. dana nakon ozračivanja.

Titar protutijela za virus newcastleske bolesti u pokusnoj i kontrolnoj skupini pilića odredili smo postupkom inhibicije hemaglutinacije u krvnom serumu pilića 7., 14., 21. i 28. dana nakon cijepljenja. Vrijednost titra protutijela za virus newcastleske bolesti u krvnom serumu izražena je kao $\log_2$.

Dobivene rezultate prikazali smo kao srednju vrijednost i standardnu devijaciju ($\bar{x} \pm SD$), a značajnost razlika provjerili smo t-testom po Studentu, koristeći računalni program STATISTICA [7].

REZULTATI

Rezultati titra protutijela za virus newcastleske bolesti u pokusnoj i kontrolnoj skupini pilića prikazani su na Slici 1. i Slici 2.

Slika 1. Titar protutijela za virus newcastleske bolesti u krvnom serumu pilića ozračenih prvog dana nakon valjenja dozom od 0,15 Gy, 0,30 Gy i 0,5 Gy i cijepljenih 3. sata nakon ozračivanja, te u krvnom serumu pilića kontrolne skupine ($\bar{x} \pm SD$).

Titar protutijela za virus newcastleske bolesti u krvnom serumu pilića ozračenih prvog dana nakon valjenja dozom od 0,15 Gy, 0,30 Gy i 0,50 Gy gama-zračenja i cijepljenih 3. sata nakon ozračivanja nije se statistički značajno razlikovao od titra protutijela virusa newcastleske bolesti u krvnom serumu pilića kontrolne skupine tijekom pokusa.

Slika 2. Titar protutijela za virus newcastleske bolesti u krvnom serumu pilića ozračenih prvog dana nakon valjenja dozom od 0,15 Gy, 0,30 Gy i 0,5 Gy i cijepljenih 14. dana nakon ozračivanja te u krvnom serumu pilića kontrolne skupine ($\bar{x} \pm SD$).

Titar protutijela za virus newcastleske bolesti u krvnom serumu pilića ozračenih prvog dana nakon valjenja dozom od 0,15 Gy, 0,30 Gy i 0,50 Gy gama-zračenja i cijepljenih 14. dana nakon ozračivanja nije se značajno razlikovao od titra protutijela virusa newcastleske bolesti u krvnom serumu pilića kontrolne skupine tijekom pokusa.

RASPRAVA

Rezultati pokusa pokazali su da se titar protutijela za virus newcastleske bolesti u krvnom serumu pilića ozračenih kao jednodnevni pilići dozom od 0,15 Gy, 0,3 Gy i 0,50 Gy, a cijepljenih prvog ili 14. dana života statistički značajno ne mijenja tijekom prva četiri tjedna života u odnosu na titar protutijela u krvnom serumu kontrolne skupine.

Ovi rezultati razlikuju se od rezultata dobivenih u pokusima na sisavcima koji se odnose na učinak male doze ionizirajućeg zračenja na imunost. Tako primjerice, Anderson i Lefkowits [8] prvi opisuju povećanje protutijela pri ozračivanju dozom od 5 do 25 cGy nakon cijepljenja. S druge strane, Ina i Sakai [9] pokazuju da i kronično ozračivanje malih glodavaca malom dozom i brzinom doze ionizirajućeg zračenja povećava staničnu

imunost. Stimulacijski učinak, također, male doze ionizirajućeg zračenja u peradi opisali su Vilić i sur [6]. Oni su, naime, pokazali da je titar protutijela za virus newcastleske bolesti u krvnom serumu tovnih pilića izvaljenih iz jaja ozračenih dozom od 0,3 Gy prije inkubacije te cijepljeni 14. dana života statistički povećan u krvnom serumu 14. dana nakon cijepljenja.

Koji je pravi razlog dobivenim rezultatima u ovom trenutku možemo samo pretpostaviti. Ipak smatramo da bi razmak između ozračivanja i cijepljenja u našem slučaju mogao biti važan čimbenik. Naime, poznato je da učinci malih doza ionizirajućeg zračenja na imunost u različitih životinjskih modela ovise, osim doze, brzine doze i o razmaku između ozračivanja i unosa stranog agensa u organizam [10]. Tako primjerice doza od 4 Gy u miševa koji su cijepljeni u kraćem vremenskom razmaku nakon ozračivanja uzrokuje značajniji pad titra protutijela. Međutim, kako se razmak između ozračivanja i cijepljenja povećava tada se i razlika vrijednosti titra protutijela ozračenih i neozračenih jedinki smanjuje, a izjednačuje se u slučaju kada se miševi cijepe 30 dana nakon ozračivanja [11].

S druge strane, kao mogući uzrok razlici dobivenih rezultata u usporedbi s rezultatima pokusa načinjenih na sisavcima ne isključujemo ni vrsnu pripadnost. Poznato je, naime, da se način nastanka protutijela u peradi razlikuje od načina nastanka protutijela u malih glodavaca i primata [12].

I na kraju, zbog vrlo oskudnih i neujednačenih podataka o učincima malih doza ionizirajućeg zračenja na imunost u peradi, osobito na staničnu imunost, smatramo da bi bilo potrebno načiniti daljnja istraživanja.

ZAKLJUČAK

Rezultati načinjenih pokusa pokazali su da ozračivanje jednodnevnih pilića dozom od 0,15, 0,30 i 0,50 Gy gama-zračenja te cijepljenje ozračenih pilića 3. sata ili 14. dana nakon ozračivanja ne uzrokuje značajnije promjene vrijednosti titra protutijela za virus newcastleske bolesti pri usporedbi sa titarom istih protutijela u neozračenih pilića.

LITERATURA

[1] Liu SZ, Liu WH, Sun JB. Radiation hormesis: its expression in the immune system. Health Phys 1987;52:579-583.

[2] Safwat A. The immunobiology of low-dose total body irradiation: more questions than answers. Radiat Res 2000;153:599-604.

[3] Liu SZ. On radiation hormesis expressed in the immune system. Crit Rev Toxicol 2003;33:431-441.

[4] Kojima S, Nakayama K, Ishida H. Low dose gamma-rays activate immune functions via induction of glutathione and delay tumor growth. J Radiat Res 2004;45:33-39.

[5] Ina Y, Sakai K. Activation of immunological network by chronic low-dose-rate irradiation in wild-type mouse strains: analysis of immune cell populations and surface molecules. Int J Radiat Biol 2005;81:721-729.

[6] Vilić M, Gottstein Ž, Ciglar Grozdanić I, Matanović K, Miljanić S, Mazija H, Kraljević P. Effect of low dose gamma-radiation upon Newcastle disease virus antibody level in chicken. Iran J Radiat Res 2009;7:27-31.

[7] StatSoft Inc. (2005) Statistica (data analysis software system). Version 7.1.

[8] Anderson RE, Lefkovits I. *In vitro* evaluation of radiation induced augmentation of the immune response. Am J Pathol 1979;79:456-461.

[9] Ina Y, Sakai K. Prolongation of Life span Associated with immunological Modificatin by Chronic low-Dose-Rate Irradiation in MRL-lpr/lpr Mice. Radiat Res 2004;161:168-173.

[10] Safwat A. The immunobiology of low-dose Total-Body irradiation: more questiones than Answers. Radiat Res 2000;153:599-604.

[11] Smirnova OA. Environmental radiation Effects on Mammals: A Dynamical Modeling Approach. Springer Science+Business Media, LLC, 2010. ISBN 978-1-4419-7212-5

[12] Ratcliffe MJH. Antibodies, immunoglobulin genes and the bursa of fabricius in chicken B cell development. Dev Comp Immunol 2006;30:101-118.

EFFECT OF LOW DOSE GAMMA-RADIATION UPON NEWCASTLE DISEASE VIRUS ANTIBODY LEVEL IN CHICKENS OF LIGHT LINE

Marinko Vilić[1], Željko Gottstein[1], Saveta Miljanić[2], Hrvoje Mazija[1] and Petar Kraljević[1]
[1]Faculty of Veterinary Medicine, University of Zagreb, Zagreb, Croatia
[2]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
marinko.vilic@vef.hr

It has been well documented that low doses of ionising radiation can stimulate humoral and cellular immunity in mammals. In literature there are only a few studies of low dose radiation effects on immunity in birds. Therefore, an attempt was made to determine the effect of low dose ionizing radiation upon specific antibody response against Newcastle disease virus (NDV) in the blood serum of chickens of light line. One-day-old male chickens of light line were irradiated with a dose of 0.15 Gy, 0.30 Gy, and 0.50 Gy gamma-radiation from panoramic ^{60}Co source. Along with the irradiated chicks there was a control group of non-irradiated chicks. Chicks were vaccinated against Newcastle disease with a commercial Newcastle disease vaccine (PESTIKAL® La Sota SPF, VETERINA d.o.o., Zagreb, Croatia) by nebulisation three hours after irradiation (experiment 1) and on the 14th day after irradiation (experiment 2). From all chickens in both experiments blood samples were collected for serological analyses from day 7 up to day 28 in weekly interval. Approximately 1 ml of blood was taken from the right jugular vein. Serum was separated by centrifugation and stored at - 18 $^{\circ}$C until use. Specific serum anti-NDV antibodies were quantified by the hemagglutination inhibition (HI) assay. The HI titre was defined as the reciprocal of the highest serum dilution completely inhibiting agglutination. Serum antibody titres were expressed as a $\log_2$ values. Antibody titre against NDV in blood serum of chickens irradiated with a dose of 0.15 Gy, 0.30 Gy and 0.50 Gy gamma-rays and vaccinated against Newcastle disease three hours after irradiation and on the 14th day after irradiation was not significantly changed. The obtained results showed that exposure of one-day-old chickens with the acute low dose of 0.15 Gy, 0.3 Gy and 0.50 Gy gamma-radiation three hour before vaccination and on the 14th day before vaccination do not have effects on humoral immunity in chickens.

THE ROLE OF FLAVONOIDS AS POTENTIAL RADIOPROTECTORS

Vesna Benković[1], Domagoj Đikić[1], Anica Horvat Knežević[1], Duje Lisičić[1], Nada Oršolić[1] and Nevenka Kopjar[2]
[1]Department of Animal Physiology, Faculty of Science,
University of Zagreb, Zagreb, Croatia
[2]Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
vesna@biol.pmf.hr

INTRODUCTION

It is well established that exposure to ionising radiation by direct ionisation and through generation of toxic free radicals causes DNA damage (single strand breaks, double strand breaks, oxidative damage to sugar and base residues, chromosomal aberration and mutations as well as dose dependent series of potentially fatal physiologic and morphologic changes, known as hematopoietic syndrome [1,2]. Destruction of lymphoid and hematopoietic systems is the primary cause of septicemia and death.

Chemical radioprotectors (AET, WR2721, WR 1065, etc.) express toxic side effects that limit their use in medical practice [3]. Investigations for effective and non toxic compounds with radioprotection capability led to increasing interest in naturally occurring antioxidants.

Antioxidant activity of flavonoids is based on their ability of direct free radicals scavenging or stabilizing the reactive oxygen species (ROS) by interacting with the reactive compound of the radical. Because of the high reactivity of the hydroxyl substituents of flavonoids, radicals are made inactive [4-6]. Flavonoids can also increase the function of the endogenous antioxidant enzyme systems: superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPx), glutathione reductase (GR) and gluthation [7]. Antioxidant effects may be also a combined result of radical scavenging and interaction with enzyme functions. Flavonoids induce activities of the immune system as well [8]. Increased hematopoietic activity could account for the improved hematopoietic tolerance to radiotherapy [9, 10]

The aim of this study was to evaluate radioprotective effects of selected flavonoids (caffeic acid, chrysin, naringin and quercetin) administered to mice prior to whole-body irradiation with γ-rays. The survival analysis and alkaline comet assay on white blood cells were employed both on irradiated and non-irradiated animals.

MATERIALS AND METHODS

Animal studies were carried out according to the guidelines in force in Republic of Croatia (Law of the Animal protection, 2006) Male and female CBA inbred mice from our conventional animal facility were used. Mice were three months old, approximately 20 g body weight at the initiation of the experiment, and were housed at 22 ± 1 ^{o}C and 50-70 % humidity with a 12 / 12 h light/dark cycle photoperiod. All animals were maintained on a standard diet (4 RF 21, Mucedola s.r.l., Italy and water *ad libitum*).

Whole-body irradiation (WBI) was performed using a ^{60}Co γ-ray source (situated at the Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia). Mice were placed in Plexiglas® cages and irradiated in groups of five animals simultaneously. The source-to-skin distance was 291 cm with a dose 0.0233 Gy/sec. Absorbed dose was 9 Gy.

For the survival analysis, mice (n = 11 per group) were treated with test components (*i. p.* at a dose of 100 mg kg^{-1} body weight) for 3 consecutive days, before lethal WBI. Endpoint of experiment was determined either by spontaneous death of animals or by elective killing of the animal showing signs of pain or suffering according to established criteria. Results are expressed as percent of mean survival time of treated animals over mean survival time of the control group (treated *vs*. control, *T / C* %). The percentage of increased lifespan (*ILS %*) was calculated according to the formula:

$$ILS\,\% = (T - C) / C \times 100$$

where *T* represents mean survival time of treated animals; *C* represents mean survival time of the control group.

The alkaline comet assay was performed on whole blood samples taken 30 min. after irradiation. Appropriate negative and positive control groups (administered chemical radioprotector AET, S-(2-Aminoethyl) isothiouronium bromide hydrobromide, *i. p.* at a dose of 281 mg kg^{-1} body weight) were also selected and handled in the same manner. Experimental groups were composed of 5 mice each.

The comet assay was carried out under alkaline conditions [11]. Two slides per animal were prepared. A total of 50 comets per animal were scored (25 from each of the two replicate slides). Random fields were selected, at a constant depth of the gel, avoiding the edges, and occasional dead cells, and the comets were captured. Microscope image was transferred to a computer-based image analysis system (Comet Assay II, Perceptive Instruments Ltd. Suffolk, UK) using a black and white camera. Three main

comet parameters were evaluated: tail length (presented in micrometers), tail intensity (DNA % in comet tail) and tail moment.

Statistical analyses were carried out using Statistica 7.0 software (StatSoft, Tulsa, USA). Each sample was characterized for the extent of DNA damage by considering the mean (± standard error of the mean), median and range for the comet parameters measured. In order to normalize distribution and to equalize the variances, a logarithmic transformation of data was applied. Multiple comparisons between groups were done by means of the analysis of variance (ANOVA) on log-transformed data. Post-hoc analysis of differences was done by Scheffé test. The level of statistical significance was set at $p < 0.05$. Treatment-dose specific survival curves were calculated according to Kaplan-Meier method and log rank test ($p < 0.05$).

RESULTS

Survival analysis showed statistically significant difference in surviving time of WBI mice pre-treated with test components as compared with positive and negative control (Table 1, Figure 1). The most effective component was quercetin showing the protection similar to that achieved by

Table 1. Survival of mice after exposure to whole-body gamma irradiation

Group[a]	**Mean survival time in days (range)**	***ILS %***	***T / C%***	**Long-term survivors (LTS %)**
Caffeic acid	25.54 (7–60)*	189.97	289.96	3 (27.27)
Chrysin	23.54 (10–60)*	158.96	258.96	2 (18.18)
Naringin	33.81 (11–60)*	390.64	371.94	5 (45.45)
Quercetin	47.27 (12–60)*	435.31	148.66	8 (72.72)
Negative control	9.09 (5–12)			
Positive control (AET)	52.09 (16–60)*	473.01	537.04	9 (81.82)

[a]Mice (n = 11) were exposed to an acute whole–body gamma radiation dose of 9 Gy; test components were given to mice *i. p.* before irradiation, daily for 3 consecutive days, and the daily dose contained 100 mg kg^{-1} body weight

T / C, treated *vs*. control; *ILS %* (increased life span %) = $(T - C) / C \times 100$

T – mean survival days of treated group; *C* – mean survival days of control group

LTS – Long-term survivors; mice surviving more than 60 days after treatment

the AET; such a huge protective effect of quercetin could result from its chemical structure having the most suitable form for scavenging free radicals. All other polyphenolic compounds were also effective in protection against radiation induced damage.

A single whole-body exposure to ionizing radiation results in a complex set of symptoms whose onset, nature, and severity are a function of both, total radiation dose and radiation quality. The hematopoietic syndrome occurs at dose 2.5 – 8 Gy; it is manifested by hematopoietic stem cell depletion, and ultimately by depletion of mature hemopoetic and immune cells. In this study, the pathological cellular emptiness of bone marrow and spleen in mice which died at day fifth after lethal WBI indicated that their death could have been prescribed to the hemopoetic syndrome.

Figure 1. The Kaplan-Meier survival curves for mice (n = 11) treated with caffeic acid, chrysin, naringin and quercetin before irradiation. The test compounds were given to mice *i. p.* daily for 3 consecutive days, and the daily dose contained 100 mg/kg body weight; one hour after the last treatment, mice were exposed to an acute whole-body gamma radiation dose of 9 Gy. Positive control was treated with AET (281 mg kg^{-1}). The results of log rank test show that test substances significantly reduced the total body injury on the level of organism ($p < 0.05$) and increased life span of mice after irradiation with dose of 9 Gy.

Tail intensity (DNA %) values measured in mice treated preventively with tested compounds were significantly lower as compared to irradiated negative control ($p < 0.05$, ANOVA with Scheffé test). Based on the results obtained with comet assay, tested flavonoids were not genotoxic to non-irradiated mice. There were some, but not significant inter-group differences observed (Table 2).

Table 2. Tail intensity (DNA %) estimated by the alkaline comet assay in peripheral blood leukocytes of mice

Group	Irradiated[a]			Non-irradiated[b]		
	Tail intensity (DNA %)					
	Mean±S.E.	M	Range	Mean±S.E	M	Range
Caffeic acid	3.12±0.23*	1.91	0 - 20.33	2.90±0.31	1.05	0 - 31.47
Chrysin	5.36±0.27	4.24	0 - 23.29	2.55±0.27	0.95	0 - 34.43
Naringin	6.44±0.35	5.11	0 - 31.27	2.30±0.30	0.47	0 - 42.47
Quercetin	4.66±0.27	3.23	0 - 32.38	2.82±0.35	1.01	0 - 37.76
Positive control[c)]	4.32±0.24*	3.41	0 - 23.77	3.00±0.31	0.97	0 - 32.08
Negative control[d)]	5.96±0.39	3.66	0 - 36.17	2.19±0.23	0.72	0 - 30.25

a) Test components were given to mice (n = 5) *i. p.* before irradiation (9 Gy), daily for 3 consecutive days, and the daily dose contained 100 mg kg^{-1} body weight.
b) Test components were given to mice (n = 5) i. p. daily for 3 consecutive days, and the daily dose contained 100 mg kg^{-1} body weight. 250 comets per group were evaluated. *$p < 0.05$ as compared to negative control (ANOVA).
c) Positive control, AET (281 mg kg^{-1}).
d) Negative control, mice irradiated only.

CONCLUSION

Since flavonoids evaluated here showed effectiveness in radioprotection, it appears that they should be considered as promising non-toxic dietary supplements to be further tested for administration in patients exposed to radiation as well as to subjects working in hazardous occupational settings.

Acknowledgements

This study was supported by the Ministry of Science, Education and Sports of the Republic of Croatia (Grants No. 022-0222148-2137 and No. 119-0000000-1255).

LITERATURE

[1] Karbownik M, Reiter JR. Antioxidative effects of melatonin in protection against cellular damage caused by ionizing radiation.Proc Soc Exp Biol Med 2000;225:9-22.

[2] Sankaranarayanan K. Estimation of the genetic risks of exposure to ionizing radiation in humans: current status and emerging perspectives. J Radiat Res 2006;47:B57-66.

[3] Grdina DJ, Sigdestad CP. Radiation protectors: The unexpected benefits. Drug Metab Rev 1989;20:13-42.

[4] Nijveldt RJ, van Nood E, van Hoorn DE, Boelens PG, van Norren K, van Leeuwen PA. Flavonoids: a review of probable mechanisms of action and potential applications. Am J Clin Nutr 2001;74:418-425.

[5] Heim KE, Tagliaferro AR, Bobilya DJ. Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure activity relationships. J Nutrit Biochem 2002;13:572-584.

[6] Liu GA, Zheng RL, Protection against damaged DNA in the single cell by polyphenols. Pharmazie 2002;57:852-854.

[7] Russo A, Acquaviva R, Campisi A, Sorrenti V, Di Giacomo C, Virgata G, Barcellona ML, Vanella A. Cell Biol Toxicol 2000;16:91-98.

[8] Oršolić N, Bašić I. Recent Progress in Medicinal Plants 2006;17:55-113.

[9] Behling UH. The radioprotective effect of bacterial endotoxin. In: Nowotny A. ed. Beneficial effects of Endotoxin. Plenum Press, New York. 1983. pp.127-131.

[10] Patchen ML. Immunomodulators and cytokines: their use in the mitigation of radiation-induced hemopoietic injury. In: Bump EA, Malaker K. eds. Radioprotectors: Chemical, Biological, and Clinical Perspectives, CRC Press, New York, 1997, pp 213-236.

[11] Singh NP, McCoy MT, Tice RR, Schneider LL. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. Exp Cell Res 1988;75:184-191.

INHIBICIJA FOTO-GENOTOKSIČNIH UČINAKA UV ZRAČENJA NA LIMFOCITIMA PERIFERNE KRVI ČOVJEKA POMOĆU EKSTRAKTA VRSTE *Echinacea purpurea* (L.) Moench

Maja Šegvić Klarić[1], *Ivan Kosalec*[1], *Mirta Milić*[2], *Sanda Vladimir-Knežević*[1], *Biljana Blažeković* [1] *i Nevenka Kopjar*[2]
[1]Sveučilište u Zagrebu, Farmaceutsko-biokemijski fakultet, Zagreb
[2]Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Jedinica za mutagenezu, Zagreb
msegvic@pharma.hr

UVOD

Ultraljubičasto (UV) zračenje uzrokuje promjene na ljudskoj koži koje se dovode u vezu s preranim starenjem te povećanim rizikom od nastanka tumorskih tvorbi, posebice zloćudnih melanoma. Dugotrajna izloženost UV svjetlu potiče nastanak upalnih procesa i oksidativni stres u stanicama koji uzrokuju oštećenja u molekuli DNA [1]. Novija istraživanja kancerogeneze na staničnoj i molekularnoj razini dovela su do pojačanog zanimanja za kemoprevenciju nastanka tumora, što uključuje i istraživanja moguće zaštitne uloge biljnih polifenola. Smatra se da unos polifenola hranom ili putem farmaceutskih pripravaka može usporiti, odgoditi ili spriječiti oštećenja nastala i UV zračenjem, odnosno fotokancerogenezu [2,3]. Rezultati dosadašnjih istraživanja upućuju na zaštitnu ulogu pripravaka dobivenih iz biljke *Echinacea purpurea* na sniženje razine kromosomskih aberacija u limfocitima periferne krvi ispitanika profesionalno izloženih ionizirajućem zračenju [4], te njihov zaštitni učinak na limfocite izložene citotoksičnim lijekovima u uvjetima *in vitro* [5]. Ehinaceja vrste sadrže imunomodulatorne sastavnice koje stimuliraju nespecifični imunološki sustav (aktivnost makrofaga, tvorbu kemokina i citokina, pojačano stvaranje NK-stanica i drugo), ali djeluju i antioksidativno i protu-upalno, a za što su odgovorne fenolkarboksilne kiseline, alkilamidi i acetilamidi [6].

Cilj ovog istraživanja bio je ispitati može li pred-tretman ljudskih limfocita periferne krvi s ekstraktom ljubičaste ehinaceje (*Echinacea purpurea* (L.) Moench) spriječiti ili umanjiti razinu primarnih oštećenja DNA izazvanih izlaganjem UV zračenju u laboratorijskim uvjetima.

MATERIJAL I METODE

Biljni pripravak (EH) testiran u pokusu dobiven je iz suhih nadzemnih dijelova ljubičaste ehinaceje (*Echinacea purpurea* (L.) Moench; Asteraceae) u cvatu (Jan-Spider d.o.o., Hrvatska). Ekstrakt je pripremljen iscrpljivanjem s 10 %-tnim etanolom u ultračistoj vodi uz povratno hladilo na 60–70 °C tijekom 60 minuta, te na kraju postupka liofiliziran. Sastav droge određen je spektrofotometrijskim postupcima prema Europskoj farmakopeji [7], a udio cikorijine kiseline u EH izokratnim HPLC-postupkom [8]. U pokusu su korištene koncentracije 1 mg/mL i 10 mg/mL koje su svježe priređene otapanjem liofilizata u ultračistoj vodi.

Davatelj krvi korištene u pokusu bio je zdravi muškarac u dobi od 40 godina, koji tijekom zadnjih godinu dana nije bio profesionalno ni u dijagnostičke svrhe izložen fizikalnim ili kemijskim mutagenima. Uzorak periferne krvi (V = 20 mL) izvađen je iz kubitalne vene u sterilni heparinizirani spremnik. Izolacija limfocita provedena je s pomoću otopine Histopaque®-1077 (Sigma-Aldrich, SAD) standardnim postupkom [9]. Pročišćeni talog limfocita suspendiran je u hranjivom mediju RPMI 1640 (Gibco, UK) i podijeljen u manje volumene (V = 1 mL) koji su preneseni u mikrotitarsku pločicu. Pokus je napravljen u triplikatu.

Priređene su sljedeće pokusne skupine: kontrola, uzorak limfocita pred-tretiran vodenom otopinom liofilizata EH koncentracije 1 mg/mL (EH1), uzorak limfocita predtretiran vodenom otopinom liofilizata EH koncentracije 10 mg/mL (EH2), uzorci limfocita izloženi UV svjetlu 30 min (UV1) i 60 min (UV2), te uzorci limfocita koji su nakon 60 min pred-tretmana s obje koncentracije EH zračeni UV zračenjem 30 min ili 60 min (EH1+UV1; EH2+UV1; EH1+UV2; EH2+UV2). Izvor UV zračenja bila je germicidna živina žarulja (15 W; 57415P/40 Philips, SAD), koja emitira UVC zračenje valne duljine 253,7 nm. Tijekom pokusa mikrotitarske pločice su držane grijaćoj ploči, koja je održavala stabilnu temperaturu od 37 ^{o}C, i na udaljenosti 10 cm od izvora zračenja. Po završetku tretmana, uzorci stanica iskorišteni su za pripremu mikrogelova za komet-test u alkalnim uvjetima prema standardnom protokolu [10].

Mjerenja kometa provedena su pomoću fluorescencijskog mikroskopa (Leitz Wetzlar, Njemačka) i računalnog programa za analizu slike (Comet Assay II, Perceptive Instruments Ltd., UK). U svakom je uzorku izmjereno 150 kometa. Mjereni su dužina repa kometa, intenzitet repa (% DNA u repu) i repni moment, koji su prikazani kao srednje vrijednosti sa standardnom devijacijom. Normalnost distribucije izmjerenih podataka testirana je

Kolmogorov-Smirnovim testom, nakon čega je provedeno njihovo logaritmiranje. Za utvrđivanje značajnosti razlike među pokusnim skupinama primijenjena je jednosmjerna analiza varijance (ANOVA) i Tukeyev post-test višestruke usporedbe za razinu značajnosti $P < 0,05$.

REZULTATI I RASPRAVA

Ekstrakt vrste *E. purpurea* sadrži 3,47 % fenolnih kiselina, 0,13 % flavonoida, 0,86 % trjeslovina te 0,26 % proantocijanidina. HPLC analizom liofilizata utvrđen je udio cikorijine kiseline od 3,65 %.

Rezultati komet-testa prikazani su na Slici 1. Izlaganje limfocita UV zračenju (30 i 60 min) uzrokovalo je porast razine primarnih oštećenja DNA. Utvrđeno je statistički značajno povećanje vrijednosti svih kometnih parametara ($P < 0,001$). Šezdesetminutni pred-tretman limfocita s obje koncentracije EH nije djelovao genotoksično, a istovremeno je uspješno zaštitio limfocite od djelovanja UV zračenja. Utvrđeno je statistički značajno smanjenje vrijednosti sva tri kometna parametra nakon 30 min UV zračenja ($P < 0,001$). Obje koncentracije EH značajno su smanjile dužinu repa kometa nakon 60 min UV zračenja, a samo prethodno tretiranje s 1 mg/mL EH značajno je smanilo % DNA u repu i repni moment ($P < 0,001$).

Poznato je da Sunčevo UV zračenje oštećuje DNA putem izravnih i neizravnih mehanizama. Ciklobutanski dimeri pirimidinskih baza i (6-4) fotoprodukti najvažnije su vrste izravnih oštećenja u molekuli DNA i odgovorni su za većinu citotoksičnih, mutagenih i kancerogenih učinaka kratkovalnog UVC i UVB zračenja. Neizravni mehanizmi oštećenja DNA uključuju nastanak oksidativnih modifikacija na bazama, lomove, gubitak baza te ukrižena povezivanja DNA i proteina [11]. UVC zračenje, čije smo učinke istraživali, ima manju prodornost od UVB i UVA pa ga većinom apsorbira epidermalni sloj kože. Međutim, zbog najvećeg sadržaja energije, UVC ima i najveći potencijal za oštećenje stanica, čime se dovodi u izravnu vezu s nastankom opeklina na koži te bazocelularnih karcinoma kože [12]. U ovome smo istraživanju utvrdili da se primjenom komet-testa u alkalnim uvjetima mogu osjetljivo detektirati oštećenja limfocitne DNA nastala nakon izlaganja UVC zračenju. S obzirom na trajanje izloženosti, razina izmjerenih oštećenja vjerojatno je bila rezultat: izravnih oštećenja molekule DNA, njihova popravka (koji zbog isijecanja oštećenih baza povećava količinu jednolančanih lomova) te oksidativnog stresa prouzročenog u stanicama djelovanjem reaktivnih kisikovih radikala. Dobiveni rezultati u skladu su sa zapažanjima drugih autora [11,13].

Slika 1. Primarna oštećenja DNA utvrđena primjenom komet-testa u ljudskim limfocitima koji su izloženi UV zračenju u laboratorijskim uvjetima nakon 60-minutnog pred-tretmana s ekstraktom *E. purpurea* ili bez pred-tretmana.
A – dužina repa kometa; B – intenzitet repa (% DNA u repu); C – repni moment kometa
Kontrola: netretirani limfociti;
PK: pozitivna kontrola (limfociti tretirani s 100 μM otopinom vodikova peroksida 10 min na ledu);
EH1 i EH2: vodena otopina liofilizata *E. purpurea* koncentracije 1 mg/mL i 10 mg/mL;
UV1 i UV2: limfociti izloženi UV svjetlu 30 min i 60 min;
EH1+UV1, EH2+UV1, EH1+UV2, EH2+UV2: 60-minutni pred-tretman s vodenim otopinama biljnog liofilizata nakon kojega su limfociti ozračeni UV svjetlom 30 min i 60 min.
Statistički značajne razlike: * – *vs* kontrola($P < 0,05$); a – UV1 *vs* EH1+UV1 i EH2+UV1 ($P < 0,05$); b – UV2 *vs* EH1+UV2 i EH2+UV2.

Foto-protektivni učinak vodene otopine liofilizata *E. purpurea* može se pripisati fenolnim sastavnicama kao što su kavena kiselina i njezini derivati za koje je dokazano antioksidativno djelovanje [6,14,15]. Među derivatima kavene kiseline cikorijina kiselina i ehinakoizid imaju veći antioksidativni potencijal od ostalih prisutnih sastavnica [14] te se može pretpostaviti da upravo visoki sadržaj cikorične kiseline doprinosi foto-protektivnom učinku korištenog liofilizata koji je utvrđen primjenom komet-testa. Na osnovi dobivenih rezultata zaključujemo da pred-tretman ekstraktom *E. purpurea* vjerojatno potiče aktivnost enzimskih sustava koji stanicu štite od negativnih utjecaja slobodnih radikala, primjerice katalaze, superoksid dismutaze kao i glutationa. Na taj su način, pred-tretirani limfociti mogli učinkovitije ukloniti reaktivne radikale, koji imaju visoki potencijal za oštećenje molekule DNA, u odnosu na stanice koje su bile ozračene bez ikakvog pred-tretmana.

ZAKLJUČAK

Na limfocitima periferne krvi primjenom komet-testa dokazan je foto-protektivni učinak ekstrakta *Echinacea purpurea.* Pozitivni rezultati dobiveni u ovom istraživanju govore u prilog nastavka istraživanja djelotvornosti pripravaka *Echinacea purpurea* i njihove moguće primjene u razvoju proizvoda za zaštitu kože. Daljnja će se istraživanja na razini stanica usmjeriti ponajprije prema ljudskim keratinocitima, kao ciljnim stanicama za djelovanje UVC zračenja.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu projekata MZOŠ: 006-0061117-1242, 006-0061117-1238 i 022-0222148-2137.

LITERATURA

[1] Nichols JA, Katiyar Santosh K. Skin photoprotection by natural polyphenols: Anti-inflammatory, anti-oxidant and DNA repair mechanisms.Arch Dermatol Res 2010;302:71-83.

[2] Afaq F, Adhami VM, Ahmad N, Mukhtar H. Botanical antioxidants for chemoprevention of photocarcinogenesis. Front Biosci 2002;7:784-792.

[3] Baliga MS, Katiyar SK. Chemoprevention of photocarcinogenesis by selected dietary botanicals. Photochem Photobiol Sci 2006;5:243-253.

[4] Joksić G, Petrović S, Joksić I, Leskovac A. Biological effects of *Echinacea purpurea* on human blood cells. Arh Hig Rada Toksikol 2009;60:165-172.

[5] Kopjar N, Želježić D, Kosalec I, Bakmaz M, Jug M. Cytoprotectivity of plant extracts on doxorubicin and irinotecan-treated human peripheral blood lymphocytes. Planta Med 2007;73:981.
[6] Kosalec I. *Echinacea* vrste-biljni imunostimulansi (od iskustva Indijanaca do moderne fitofarmacije). Vlastita naklada, Zagreb, 2006. ISBN 953-95571-0-0.
[7] European Directorate for the Quality of Medicines and Health Care (EDQM). European Pharmacopoeia, 4th edition. Strasbourg, France, Council of Europe, 2004.
[8] Gray DE, Roberts CA, Rottinghaus GE, Garrett HE, Pallardy SG. Quantification of root chicoric acid in purple coneflower by near infrared reflectance spectroscopy. Crop Sci 2001;41:1159-1161.
[9] Histopaque®-1077 (Procedure No. 1077). http://www.sigmaaldrich.com/etc/medialib/docs/Sigma/General_Information/1/1077.Par.0001.File.tmp/1077.pdf
[10] Singh NP, Mc Coy MT, Tice RR, Schneider EL. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. Exp Cell Res 1988;175:184-191.
[11] Kielbassa C, Roza L, Epe B. Wavelength dependence of oxidative DNA damage induced by UV and visible light. Carcinogenesis 1997;18:811-816.
[12] Roberts JE. Therapeutic effects of light in humans. In: Coohil TP, Valenzano DP, eds. Photobiology for the 21st century, pp. 17-29. Overland Park, Kansas, Vandemar Publishing Company, 2001.
[13] Cipollini M, He J, Rossi P, Baronti F, Micheli A, Rossi AM, Barale R. Can individual repair kinetics of UVC-induced DNA damage in human lymphocytes be assessed through the comet assay? Mutat Res 2006;601:150-161.
[14] Pellati F, Benvenuti S, Magro L, Melegari M, Soragni F. Analysis of phenolic compounds and radical scavenging activity of *Echinacea* spp. J Pharm Biomed Anal 2004;35:289-301.
[15] Yamada Y, Yasui H, Sakurai H. Suppressive Effect of caffeic acid and its derivatives on the generation of UVA-induced reactive oxygen species in the skin of hairless mice and pharmacokinetic analysis on organ distribution of caffeic acid in ddY mice. Photochem Photobiol 2006;82:1688-1676.

INHIBITION OF PHOTO-GENOTOXIC EFFECTS OF UV RADIATION ON HUMAN PERIPHERAL BLOOD LYMPHOCYTES BY *Echinacea purpurea* (L.) Moench HERBAL EXTRACT

Maja Šegvić Klarić[1], *Ivan Kosalec*[1], *Mirta Milić*[2], *Sanda Vladimir-Knežević*[1], *Biljana Blažeković*[1] *and Nevenka Kopjar*[2]
[1]University of Zagreb, Faculty of Pharmacy and Biochemistry, Zagreb, Croatia
[2]Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
msegvic@pharma.hr

Ultraviolet (UV) radiation has many negative effects on human skin, including acute and chronic inflammation and oxidative stress which might cause DNA damage leading to skin photoaging and photocarcinogenesis. It was suggested that intake of phenolic acids, which are active components of some medicinal plants, might reduce DNA damage caused by UV radiation. Therefore, the purpose of this study was to check wheather the pretreatment of human peripheral blood lymphocytes with lyophilisate of *Echinacea purpurea* (L.) Moench (EH) extract (1 and 10 mg/mL) could reduce or prevent primary DNA damage induced by UVC radiation (253.7 nm) in laboratory conditions. Primary DNA damage was studied using the alkaline comet assay on isolated human blood lymphocytes. Plant extract used in this experiment contains phenolic acids (3.47 %), flavonoids (0.13 %), tannins (0.86 %) and proanthocyanidins (0.26 %). HPLC analysis showed that lyophilisate of EH extract contains 3.65 % of chicoric acid. Exposure of lymphocytes to UV radiation (30 and 60 min) caused a significant increase in the level of primary DNA damage ($P < 0.001$). Pretreatment of cells with both concentrations of EH was not genotoxic, and successfully protected the cells against the effects of UV radiation (30 min). Both concentrations of EH significantly reduced comet tail length after 60 min of UV radiation, while only pre-treatment with 1 mg/mL significantly reduced the values of tail intensity and tail moment ($P < 0.001$). Positive results obtained in this study speak in favour of continuing the research on effectiveness of *Echinacea purpurea* preparations and their potential application in developing cosmetic products for skin protection.

IZLOŽENOST STANOVNIŠTVA ZRAČENJU

PUBLIC EXPOSURE

PROCJENA IZLOŽENOSTI ZRAČENJU STANOVNIŠTVA RH PO REGIJAMA

Gordana Marović, Zdenko Franić, Gina Branica, Jadranka Kovač i Jasminka Senčar
Jedinica za zaštitu od zračenja
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
marovic@imi.hr

UVOD

Zaštita od zračenja danas je razvijena doktrina i znanstvena disciplina koja holističkim pristupom vodi brigu o zračenju, o ljudima izloženima zračenju, ali istovremeno i o ljudskom okruženju i o okolišu. Razvojni trendovi znanosti o zračenju, zaštite od zračenja i tehnološkog područja koje se njima bavi, neprestano unose nove sastavnice u doktrinu zaštite od zračenja, što novim preporukama dovodi do minimiziranja izlaganja zračenju. Kako bi se očuvala radiološka čistoća habitata i minimizirao rizik, brojnim se propisima i preporukama pokušava urediti život i djelatnost ljudi u stvarnom životnom okruženju. Uvažavanjem međunarodnih preporuka i propisa, kao i pravnih stečevina Europske unije, područje zaštite od zračenja jedno je od zakonski uređenijih područja u Republici Hrvatskoj [1-5].

Jedinica za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada iz Zagreba (IMI) ovlaštena je za obavljanje stručnih poslova zaštite od ionizirajućeg zračenja. Praćenje stanja radioaktivnosti uzoraka životne sredine na teritoriju Republike Hrvatske, Jedinica kroz propisana uzorkovanja, mjerenja, radiokemijske analize, te obradu i tumačenje podataka, provodi neprekidno još od 1959. godine. U godišnjim izvještajima su detaljno navedeni rezultati, lokacije i regije na kojima se provode mjerenja i skupljaju uzorci, principi radiokemijskih metoda, te instrumenti korišteni u postupcima analiza i mjerenja [6]. Stvorene baze podataka osnova su za proračune svakog od načina ili putova (*Exposure Pathways*) izlaganja ljudi i okoliša radioaktivnim supstancijama. Kako bi se kvantificirale eventualne posljedice, analizira se potencijal i učinci izlaganja za tri osnovna moguća puta izlaganja različitim radionuklidima prisutnim u okolišu. Ti putovi jesu: izravna (vanjska) izloženost ionizirajućem zračenju, inhalacija i ingestija.

Ovaj rad je pokušaj da se na primjeru regionalnih razlika u koncentracijama aktivnosti odabranih radionuklida u zraku i lokalnim namirnicama pokaže važnost i nužnost individualizacije doznih izračuna s jedne strane i potrebitost spoznaja o provedenim kontrolama namirnica na globalnoj razini s druge strane.

MATERIJAL I METODE

Tijekom 2009. godine u Jedinici za zaštitu od zračenja IMI provedena su sva potrebna mjerenja, uzorkovanja, radiokemijska određivanje i alfa, beta i gama spektrometrijske analize sukladno Zakonu i Pravilniku [1,5]. Odabrani su rezultati analiza zraka, voda i nekih namirnica u dvije regije. Sjeverozapadna Hrvatska i grad Zagreb objedinjeni su u jednu regiju SZH, dok drugu regiju, Priobalje, predstavljaju Dalmacija, Primorje i otoci [6].

Državni zavod za statistiku je i za 2009. godinu objavio podatke o potrošnji pojedinih namirnica u Hrvatskoj [7]. Odabrane su vrijednosti godišnjeg unosa svake pojedine namirnice za odraslog stanovnika Hrvatske. Proveden je izračun doza temeljem podataka iz baze podataka o koncentracijama aktivnosti, podataka Državnog zavoda za statistiku kao i principa i podataka iz *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources* [3].

REZULTATI

Na Slici 1 prikazani su doprinosi pojedinih radionuklida (^{7}Be, ^{40}K, ^{137}Cs, ^{90}Sr) efektivnoj dozi od unosa udisanjem. Efektivna doza od unosa udisanjem procijenjena je za odraslog stanovnika Priobalja i SZH iz prosječnih koncentracija u zraku izmjerenih nuklida tijekom 2009. godine. Za procjenu efektivne doze zračenja uslijed unosa radioaktvnih tvari hranom i pićem uz izračunate koncentracije radioaktivnih tvari u širokom spektru namirnica korišteni su podaci o potrošnji odraslog stanovnika Hrvatske u 2009. godini [7].

Na Slici 2 prikazan je godišnji unos svake pojedine odabrane namirnice i vode u kilogramu.

Doprinosi efektivnoj dozi zračenja unosom ingestijom (gutanjem) koncentracija aktivnosti ^{40}K, ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{226}Ra u pojedinim vrstama hrane i piću prikazani su za prosječnog stanovnika Priobalja i SZH na Slici 3.

Slika 1. Procijenjena godišnja efektivna doza udisanjem, u nSv

Slika 2. Unosi u kilogramu vode i odabranih namirnica tijekom 2009. godine

Slika 3. Procijenjena godišnja efektivna doza u µSv za odabrane namirnice i vodu za odraslog stanovnika Priobalja i SZH

Različiti načini života i različite prehrambene navike doprinose razlikama u procjeni efektivnih doza što je vidljivo na slikama. Kako je pitka voda potencijalno vrlo podložna mogućoj kontaminaciji različitim radionuklidima i posljedičnom povećanom doznom opterećenju opće populacije, interesantno je razmotriti stanje kontaminacije pitke vode i doze primljene uslijed njene ingestije (Slika 4) [8].

Slika 4. Procijenjena godišnja efektivna doza u nSv unosom radionuklida vodom za odraslog stanovnika Priobalja i SZH

Godišnja efektivna doza procijenjena je od unosa radioaktivnih tvari ribom, u Priobalju morskom, a u SZH slatkovodnom. Procijenjena doza od unosa ^{90}Sr, ^{137}Cs i ^{40}K ribom prikazana je na Slici 5.

Slika 5. Efektivna doza u nSv unosom ^{40}K, ^{90}Sr i ^{137}Cs ribom za odraslog stanovnika Priobalja i SZH

Procijenjena je i godišnja efektivna doza od unosa radioaktivnih tvari (radionuklida) mlijekom i mliječnim proizvodima temeljem podataka o unosu iz statističkog ljetopisa za 2009. godinu (Slika 6 i Slika 7).

Slika 6. Efektivna doza u nSv unosom ^{90}Sr i ^{137}Cs mlijekom i mliječnim proizvodima

Slika 7. Efektivna doza u µSv unosom ^{40}K mlijekom i mliječnim proizvodima

Na Slikama 8 i 9 prikazane su procjene doze od unosa ^{90}Sr i ^{137}Cs, odnosno ^{40}K, odabranim povrćem i voćem. Sve doze procijenjene su za odraslog stanovnika Priobalja i SZH.

Slika 8. Efektivna doza u nSv unosom ^{90}Sr i ^{137}Cs odabranim povrćem i voćem

Slika 9. Efektivna doza u µSv unosom ^{40}K odabranim povrćem i voćem

Istraživanjima radioaktivne kontaminacije uzoraka životne sredine na području Republike Hrvatske nisu zamijećene povišene vrijednosti koncentracija aktivnosti radionuklida koje bi povećale ukupnu dozu zračenja za stanovništvo Republike Hrvatske u odnosu na onu primljenu prijašnjih godina.

ZAKLJUČAK

Koncentracije aktivnosti antropogenih (tj. fisijskih) radionuklida u okolišu na području Republike Hrvatske su minimalne, što za posljedicu ima vrlo malo dozno opterećenje stanovništva. Potreban je stalni nadzor stanja radioaktivne kontaminacije okoliša i to na način da se koncentracije iskažu kao ″stvarni brojevi″ i daju mogućnost praćenja trendova.

Principi zaštite od zračenja u Republici Hrvatskoj su uglavnom usklađeni s europskom pravnom stečevinom u području zaštite od zračenja te definiraju holistički pristup minimalne - ograničene izloženosti zračenju

pojedinca iz opće populacije. Međutim, bit će potrebno daljnje usklađivanje vezano uz novi pristup ICRP-a zaštiti biljnog i životinjskog svijeta.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske (projekt: 022-0222882-2335).

LITERATURA

[1] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Narodne novine 28/2010.

[2] ICRP Committee 5 on Protection of the Environment: A Framework for Assessing the Impact of Ionizing radiation on Non-Human Species. ICRP Publication No. 91 (Vol. 33, No. 3, 2003)

[3] International Atomic Energy Agency (IAEA). Revision of the Basic Safety Standards International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Dostupno na: http://www-ns.iaea.org/standards/review-of-the-bss.asp

[4] Commission Recommendation of June 2000 on the application of Article 36 of the Euratom Treaty concerning the monitoring of the levels of radioactivity in the environment for the purpose of assessing the exposure of the population as whole. Official Journal of the European Communities, 27.07.2000. Dokument 00473_en.pdf dostupan na: http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/legislation_en.htm

[5] Pravilnik o uvjetima, načinu, mjestima te rokovima sustavnog ispitivanja i praćenja vrste i aktivnosti radioaktivnih tvari u zraku, tlu, moru, rijekama, jezerima, podzemnim vodama, krutim i tekućim oborinama, vodi za piće, hrani i predmetima opće uporabe te stambenim i radnim prostorijama. Narodne novine 60/2008.

[6] Marović G, Bituh T, Franić Z, Franulović I, Kovač J, Maračić M, Petrinec B, Petroci Lj, Senčar J, Skoko B. Praćenje stanja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj za 2009. godinu. Izvještaj IMI-CRZ-90, Zagreb 2010.

[7] Statistički ljetopis 2009.Državni zavod za statistiku Zagreb, 2010.

[8] World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality. Third edition. Volume 1. Recommendations. Geneve. WHO, 2008.

ASSESSMENT OF POPULATION EXPOSURE IN REGIONS OF REPUBLIC OF CROATIA

Gordana Marović, Zdenko Franić, Gina Branica, Jadranka Kovač and Jasminka Senčar
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
marovic@imi.hr

Radiation protection as a part of radiation science today implies holistic approach to protection of human environment and biota. In Croatia radiation protection is among those areas that are quite satisfactory harmonized with European acquits. Institute for Medical Research and Occupational Health, Radiation Protection Unit is by Croatian competent authorities notified as well as accredited for radioecological monitoring that has been continuously carried on since 1959. This includes sampling, radiochemical analyses, measurements, and interpretation of results. Resulting databases are starting point for assessment of exposure of humans and biota to ionising radiation through different exposure pathways (e.g. ingestion, inhalation, external exposure etc).

Although doses to Croatian public are minimal, this paper demonstrates the importance and need for individualization of dose assessment in the context of differences and variabilities in activity concentrations of various radionuclides in local foodstuffs. Consequently, dose assessment itself implies efficient radioecological monitoring on global and regional scales.

PROCJENA IZLOŽENOSTI STANOVNIŠTVA REPUBLIKE HRVATSKE UNOSOM ^{90}Sr MLIJEKOM

Iva Franulović, Gordana Marović, Tomislav Bituh i Zdenko Franić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
ifranulovic@imi.hr

UVOD

Radioaktivne tvari koje su prisutne u okolišu nastaju prirodnim procesima ili su posljedica ljudskog djelovanja. Kontaminacija životne sredine umjetno stvorenim radionuklidima događa se već nekoliko desetljeća kao posljedica nuklearnih proba, primjene nuklearne tehnologije u različitim sektorima ljudske djelatnosti te radioloških nesreća.

^{90}Sr je fisijski produkt koji je zbog svoje radiotoksičnosti, relativno dugog vremena poluraspada ($T_{1/2}$ ^{90}Sr = 28 god.) te lake resorpcije u tkivo čovjeka opasan za čovjeka. Stroncij je radionuklid koji se uključuje u mehanizam kruženja u biosferi, te direktno ili indirektno, preko prehrambenog lanca, dospijeva do čovjeka. Postoji nekoliko načina kako radioaktivna materija ulazi u organizam čovjeka, ali je ingestija kontaminirane hrane najznačajniji put.

Zbog svoje kemijske i biokemijske sličnosti kalciju, više od 99 % stroncija se nakuplja u kostima i zubima ljudi. Procijenjeno je da količina stabilnog stroncija u ljudskom kosturu iznosi oko 3,5 % ukupnog sadržaja kalcija [1]. Stoga je ^{90}Sr dobar indikator kretanja stroncija u ekološkom lancu od atmosfere do ljudskog organizma.

Mlijeko je jedna od osnovnih živežnih namirnica ljudi, pogotovo djece. Jedinica za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada obavlja poslove zaštite od ionizirajućeg zračenja, te njeni suradnici različitim analitičkim metodama određuju aktivnost bilo kojeg radionuklida u bilo kojem uzorku, pa tako i u mlijeku.

U ovom radu prikazani su rezultati određivanja koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u mlijeku i iz njih su procijenjene efektivne doze za populaciju po dobnim skupinama u Republici Hrvatskoj za 2010. godinu.

MATERIJALI I METODE

Uzorci mlijeka skupljaju se na četiri farme i na jednom individualnom gospodarstvu (Pušća). Mlijeko se skuplja kao dnevni uzorak, a potom spaja u mjesečni. Mjesečni se uzorci spaljuju na otvorenom plamenu, a zatim u mufolnoj peći na 650 ºC.

Alikvot pepela otopi se u dušičnoj kiselini, te se standardnom metodom ekstrakcije TBP-om uz dodatak itrijevog nosača određuje ^{90}Sr temeljem radioaktivne ravnoteže s ^{90}Y koji se mjeri u antikoincidentnom beta brojaču niskog osnovnog zračenja, model RISO GM-25-5 [2]. Vrijeme mjerenja uzoraka je minimalno 84 000 sekundi.

REZULTATI I RASPRAVA

Rezultati izmjerenih koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u mlijeku za 2010. godinu prikazani su na Slici 1.

Slika 1. Koncentracije aktivnosti ^{90}Sr u mlijeku (ZG – Zagreb, VŽ – Varaždin, ZD – Zadar, OS – Osijek, PU – Pušća)

Prosječne koncentracije aktivnosti ^{90}Sr u mlijeku iz mljekara u Zadru (13,20 Bq/m^3) i Osijeku (14,97 Bq/m^3) niže su u odnosu na prosječne koncentracije aktivnosti ^{90}Sr u mlijeku iz mljekara u Varaždinu (53,95 Bq/m^3) i Zagrebu (53,22 Bq/m^3), dok je prosječna koncentracija s individualnog gospodarstva Pušća iznosila 26,96 Bq/m^3. Na koncentraciju

^{90}Sr u mlijeku utječe način prehrane stoke, podrijetlo stočne hrane, te karakteristike vode iz pojilišta.

Procijenjena efektivna doza (u Sv) dobivena konzumiranjem mlijeka kroz određeno razdoblje ovisi o aktivnosti radionuklida prisutnih u mlijeku te o potrošnji mlijeka po stanovniku, koja prema statističkom ljetopisu Državnog zavoda za statistiku iznosi 76,9 litara godišnje po stanovniku [3]. Temeljem izračunatih prosječnih vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u mlijeku i godišnje potrošnje mlijeka po stanovniku procijenjena je efektivna doza zračenja od unosa ^{90}Sr u ljudski organizam mlijekom. U izračunu su korišteni i faktori očekivane efektivne doze po jedinici unesene aktivnosti gutanjem za ^{90}Sr za pojedince iz pučanstva za nekoliko dobnih kategorija prema Pravilniku [4] izvedenom iz Zakona o zaštiti od ionizirajućih zračenja i sigurnosti izvora ionizirajućeg zračenja [5]. Valja napomenuti da su faktori očekivane efektivne doze po jedinici unesene aktivnosti gutanjem za ^{90}Sr za pojedince iz pučanstva po dobnim skupinama preuzeti iz IAEA-inog BSS-a br. 115 [6] koji je trenutno u procesu revizije te će se još ove godine moći vidjeti jesu li pretrpjeli kakve promjene. Rezultati su prikazani u Tablici 1.

Tablica 1. Procijenjena efektivna doza od unosa ^{90}Sr mlijekom

Dobna skupina (godine)	**Faktor konverzije za efektivnu dozu**	**Mljekara Zagreb**	**Mljekara Varaždin**	**Mljekara Zadar**	**Mljekara Osijek**	**Ind. gosp. Pušća**
		Prosječne koncentracije aktivnosti mlijeka (Bq/L)				
		5,32 E-2	**5,39 E-2**	**1,32 E-2**	**1,50 E-2**	**2,70 E-2**
		Efektivne doze (nSv)				
1-2	7,3 E-8	2,98E+2	3,02E+2	0,74E+2	0,84E+2	1,51E+2
2-7	4,7 E-8	1,92E+2	1,94E+2	0,47E+2	0,54E+2	0,97E+2
7-12	6,0 E-8	2,45E+2	2,48E+2	0,60E+2	0,69E+2	1,24E+2
12-17	8,0 E-8	3,27E+2	3,31E+2	0,81E+2	0,92E+2	1,66E+2
odrasli	2,8 E-8	1,14E+2	1,16E+2	0,28E+2	0,32E+2	0,58E+2

Analizirajući izračunate efektivne doze zračenja od ^{90}Sr unesenog mlijekom možemo zaključiti da su procijenjene doze niske, a pogotovo ako se usporede s iznosima dobivenim za godine prije Čornobilja (6,7E-1 μSv), za vrijeme Čornobilja (1,8E0 μSv) te godine nakon (6,9E-1 μSv) [7].

ZAKLJUČAK

Iako procijenjene efektivne doze nisu veliko opterećenje za populaciju, ipak je potrebno neprekidno i što šire praćenje radioaktivnosti biosfere u skladu s novom doktrinom ICRP-a da je uz ljude potrebna i šira zaštita okoliša, tj. flore i faune od učinaka ionizirajućeg zračenja. To se posebice odnosi na slučajeve izvanrednih događaja, radioloških nesreća ili drugih događanja koja uzrokuju povišene koncentracije radioaktivnih izotopa.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske (projekt 022-0222882-2335).

LITERATURA

[1] Pors Nielsen S. The biological role of strontium. Bone 2004;35:583-588.

[2] U.S. Department of Energy, Environmental Measurements Laboratory (EML) procedures manual. HASL 300 Series, 1957-1997. http://www.orau.org/ptp/PTP%20Library/library/DOE/eml/hasl300/analyticalv2.pdf

[3] Državni zavod za statistiku RH, Statistički ljetopis RH 2010., prosinac 2010.; str.200.

[4] Pravilnik o granicama izlaganja ionizirajućem zračenju te o uvjetima izlaganja u posebnim okolnostima i za provedbe intervencija u izvanrednom događaju. Narodne novine 125/2006.

[5] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Narodne novine 28/2010.

[6] International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. IAEA Vienna 1996.

[7] Franić Z, Lokobauer N, Marović G. Radiostrontium activity concentrations in milk in the Republic of Croatia for 1961 – 2001 and dose assessment. Health Phys 2004;87(2):160-165.

EXPOSURE ASSESSMENT OF POPULATION OF THE REPUBLIC OF CROATIA FROM ^{90}Sr UPTAKE BY MILK CONSUMPTION

Iva Franulović, Gordana Marović, Tomislav Bituh and Zdenko Franić
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
ifranulovic@imi.hr

The program of radioactivity measurements and monitoring of the human environment in Croatia, carried out by the Radiation Protection Unit of the Institute for Medical Research and Occupational Health in Zagreb, includes also researches of radiostrontium in milk.

Radiostrontium is a very toxic radionuclide that can be deposited into the human bones because of its resemblance to calcium. It gets to the human body as a part of circulating mechanism in the biosphere, directly or indirectly, through the food chain. This paper presents the results of the monitoring of ^{90}Sr activity concentrations in milk samples from different dairy farms and one individual farm for year 2010. ^{90}Sr activity concentrations in milk samples ranged from 11.14 Bq/m^3 to 72.14 Bq/m^3. The dose incurred by milk consumption was estimated for the Croatian population. The doses received from milk consumption are small, but due to the new ICRP doctrine regarding the need for radiation protection of not only humans but also the environment, ^{90}Sr level requires continuous control and monitoring in the future.

UKUPNA BETA AKTIVNOST FRAKCIJE PM2.5 LEBDEĆIH ČESTICA U ATMOSFERI ZAGREBA

Krešimir Šega, Ivan Bešlić, Gordana Marović i Jasminka Senčar
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
ksega@imi.hr

UVOD

Radioaktivne tvari sastavni su dio atmosfere. U prizemnim slojevima prisutni su radionuklidi prirodnog podrijetla, terestrijalnog i kozmogenog. Najznačajniji izvor radioaktivnih tvari u zraku još su uvijek atmosferske nuklearne eksplozije iz početka 1960-tih godina koje su u visoke stratosferske slojeve atmosfere izbacile velike količine radioaktivnih tvari. Atmosferskim procesima te se tvari obaraju u prizemne slojeve. Nuklearna nesreća u Čornobilju prouzročila je porast količine radioaktivnih tvari u zraku samo 1986. godine. No, već sljedećih godina te su vrijednosti opet pale na predčornobiljske razine [1].

Praćenje i određivanje radioaktivnih tvari u zraku započelo je u Hrvatskoj 1961. godine i provodi se neprekidno do danas. Količina radioaktivnih tvari u zraku određuje se mjerenjem ukupne beta aktivnosti zraka, što predstavlja samo početni podatak o prisutnosti radioaktivne tvari u obrađivanom uzorku. Ukoliko se želi saznati koji je od radionuklida prisutan, provode se posebna radiokemijska određivanja pojedinih radionuklida, alfa, beta i gamaspektrometrijskim analizama.

Neprekidno praćenje onečišćenja zraka također je započelo u šezdesetim godinama dvadesetoga stoljeća, dok se određivanje ukupnih lebdećih čestica i teških metala u njima provodi od 1972. godine. Dugogodišnja istraživanja pokazala su da je sakupljanje ukupnih lebdećih čestica, zbog nedefinirane gornje granice veličine sakupljenih čestica, problematično, te da je neophodno mjeriti dobro definirane frakcije lebdećih čestica [2]. U svrhu povezivanja s mogućim negativnim zdravstvenim učincima istražuju se frakcije lebdećih čestica ekvivalentnog aerodinamičkog promjera manjeg od 10 µm odnosno 2,5 µm.

Višegodišnja istraživanja pokazala su značajnu povezanost ukupne beta aktivnosti zraka i koncentracije lebdećih čestica. Korelacija je to bolja, što su frakcije lebdećih čestica manjeg ekvivalentnog aerodinamičkog promjera [3,4]. U ovom je radu prikazan nastavak istraživanja na

međusobnoj povezanosti rezultata mjerenja ukupne β aktivnosti zraka s koncentracijama frakcije lebdećih čestica PM2.5.

MATERIJAL I METODE

Na tri mjerna mjesta lokalne mreže Grada Zagreba za praćenje onečišćenja zraka, smještena unutar užeg gradskog područja, sakupljani su uzorci frakcije lebdećih čestica PM2.5, referentnim uređajima LVS3 sukladno zahtjevima norme HRN EN 14907 (akreditirani laboratorij prema HRN EN 17025). Mjerno mjesto IMI nalazi se u sjevernom dijelu grada na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada, Ksaverska cesta 2, u stambenom području karakteriziranom većim zelenim površinama, blizinom Medvednice, individualnim ložištima na zemni plin i umjerenom do srednjom gustoćom prometa. Mjerno mjesto SIG smješteno je u Domu zdravlja Siget, Avenija Većeslava Holjevca 22, u stambenoj zoni na jugu grada u kojoj se većina stanova opskrbljuje toplinskom energijom za grijanje prostora i sanitarne vode iz udaljene gradske toplane TE-TO. Područje je karakterizirano velikom gustoćom prometa. Mjerno mjesto CRN smješteno je u Domu zdravlja Črnomerec, Prilaz baruna Filipovića 11, u zapadnom dijelu grada. Uz veliku gustoću prometa i lokalnu industriju, uz domaćinstva vezana na elektranu-toplanu EL-TO postoji i velik broj individualnih ložišta koja većinom koriste zemni plin kao energent. Na lokaciji IMI dnevni uzorci sakupljani su od podneva do podneva sedam dana u tjednu, dok su na dvije preostale lokacije uzorci vikendom integrirani u jednu cjelinu (ukupno 5 uzoraka tjedno). U ovom istraživanju korišteni su uzorci sakupljani tijekom trogodišnjeg razdoblja, od 2005. do 2007. godine. Koncentracije frakcije lebdećih čestica PM2.5 određene su uz proširenu neodređenost ($k = 2$) od 2,1 $\mu g\ m^{-3}$ za dnevne uzorke, odnosno 0,7 $\mu g\ m^{-3}$ za srednju godišnju vrijednost (± 2,8 % godišnje granične vrijednosti).

Za mjerenja ukupne beta aktivnosti korišteni su alikvotni uzorci frakcije lebdećih čestica PM2.5 (promjer 32 mm). Ukupna beta aktivnost određivana je beta brojačem za mjerenja niskih aktivnosti (GM multicounter system RISØ) 120 sati nakon uzorkovanja. Razdoblje od najmanje pet dana jest vrijeme potrebno za raspad kratkoživućih radionuklida, uglavnom nižih članova prirodnih radioaktivnih nizova urana i torija. Kalibracija efikasnosti brojača za mjerenja ukupne beta aktivnosti zraka provedena je pomoću standarda ^{40}K [5].

REZULTATI

U Tablici 1 prikazani su broj uzoraka, srednje vrijednosti te percentili razdiobe ukupne β aktivnosti uzoraka frakcije lebdećih čestica PM2.5 za sva tri mjerna mjesta i trogodišnje mjerno razdoblje. Vidljivo je da razdiobe odstupaju od normalne te da su razvučene na desnu stranu prema višim vrijednostima.

Tablica 1. Vrijednosti ukupne β aktivnosti u uzorcima PM2.5, A [μBq m^{-3}]

	IMI05	**SIG05**	**CRN05**	**IMI06**	**SIG06**	**CRN06**	**IMI07**	**SIG07**	**CRN07**
N	364	248	249	357	241	247	361	231	243
$\boldsymbol{A_{sred}}$	1113	1027	935	953	917	810	833	809	679
$\boldsymbol{A_{min}}$	272	254	142	75	117	73	82	137	42
$\boldsymbol{A_{10}}$	522	436	425	307	275	290	329	303	229
$\boldsymbol{A_{25}}$	692	579	558	506	474	430	459	441	363
$\boldsymbol{A_{50}}$	948	846	830	786	812	642	687	712	559
$\boldsymbol{A_{75}}$	1338	1173	1178	1187	1209	1029	995	1042	862
$\boldsymbol{A_{90}}$	1870	1837	1625	1793	1703	1487	1479	1402	1350
$\boldsymbol{A_{max}}$	5428	4190	3878	7977	3338	3446	6004	2759	2853

N – broj uzoraka
A_{sred} – srednja vrijednost
A_{min} – najniža vrijednost
A_x – x-ti percentil
A_{max} – najviša vrijednost

Na Slici 1 prikazane su srednje vrijednosti ukupne beta aktivnosti zraka u frakciji lebdećih čestica PM2.5 po godinama i mjernim mjestima.

Vidljiva je razlika u razinama ukupne β aktivnosti u PM2.5 frakciji lebdećih čestica po mjernim mjestima. Najviše razine izmjerene su na mjernom mjestu IMI, niže razine na mjernom mjestu SIG, a najniže na mjernom mjestu CRN. Također se opaža pad razina aktivnosti u vremenu na sva tri mjerna mjesta.

Podijele li se vrijednosti ukupne beta aktivnosti PM2.5 frakcije lebdećih čestica s njihovom masenom koncentracijom, dobiva se specifična ukupna beta aktivnost frakcije PM2.5 lebdećih čestica A_s izražena u Bq g^{-1}. U Tablici 2 prikazani su broj uzoraka, srednje vrijednosti, kao i percentili razdiobe specifične ukupne beta aktivnosti frakcije PM2.5 lebdećih čestica A_s, za sva tri mjerna mjesta i trogodišnje mjerno razdoblje.

Slika 1. Srednje vrijednosti ukupne β aktivnosti zraka u PM2.5 frakciji lebdećih čestica po mjernim mjestima i godinama

Tablica 2. Vrijednosti specifične ukupne β aktivnosti frakcije PM2.5 lebdećih čestica A_s [Bq g^{-1}]

	IMI05	**SIG05**	**CRN05**	**IMI06**	**SIG06**	**CRN06**	**IMI07**	**SIG07**	**CRN07**
N	363	248	248	364	243	247	362	237	243
$A_{s\ sred}$	48,0	30,8	33,0	38,7	30,4	31,2	47,0	34,3	33,7
$A_{s\ min}$	14,3	4,1	3,2	6,6	4,3	6,4	5,9	4,5	3,9
$A_{s\ 10}$	21,9	12,4	14,0	18,7	12,5	14,7	17,6	11,9	12,3
$A_{s\ 25}$	30,0	18,4	20,3	24,9	17,4	19,7	26,7	16,3	17,6
$A_{s\ 50}$	44,1	28,9	31,5	36,6	25,9	26,2	38,6	27,6	27,9
$A_{s\ 75}$	61,8	39,1	41,7	48,0	37,5	39,7	55,9	44,0	43,4
$A_{s\ 90}$	78,4	51,6	53,4	61,2	55,1	52,5	79,9	64,5	54,5
$A_{s\ max}$	224,6	118,6	148,2	127,9	108,2	95,8	421,8	160,2	553,6

N – broj uzoraka
$A_{s\ sred}$ – srednja vrijednost
$A_{s\ min}$ – najniža vrijednost
$A_{s\ x}$ – x-ti percentil
$A_{s\ max}$ – najviša vrijednost

Slika 2 prikazuje srednju vrijednost specifične ukupne β aktivnosti frakcije PM2.5 lebdećih čestica. Razine su značajno više na mjernom mjestu IMI u odnosu na ostala dva mjerna mjesta. Ni na jednom mjernom mjestu nije vidljiva naznaka trenda.

Slika 2. Srednje vrijednost specifične ukupne β aktivnosti frakcije PM2.5 lebdećih čestica, po mjernim mjestima i godinama

ZAKLJUČAK

Najviše razine ukupne β aktivnosti frakcije lebdećih čestica PM2.5 u zraku Zagreba izmjerene su na mjernom mjestu IMI, niže na mjernom mjestu SIG, a najniže na mjernom mjestu CRN. Uočljiva je naznaka trenda snižavanja razina na sva tri mjerna mjesta u promatranom razdoblju.

Razine specifične ukupne β aktivnosti frakcije lebdećih čestica PM2.5 su značajno više na mjernom mjestu IMI u odnosu na druga dva mjerna mjesta što ukazuje na viši udio radionuklida, β emitera, u sastavu čestica. Ne uočava se naznaka trenda.

Ciljevi daljnjih istraživanja su povezivanje dobivenih rezultata s rezultatima postojećih podataka o praćenju radioaktivnosti u Zagrebu, te zdravstvenim učincima putem izračuna rizika i doza.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske (projekti: 022-0222882-2335 i 022-0222882-2271)

LITERATURA

[1] Franić Z, Cesar D, Marović G, Senčar J. Radiaoactive mater in the Zagreb air from 1961 to 1996. Hrv Meteor Časopis 1997;32:51-8.

[2] Šega K. Razvoj i prva ispitivanja uređaja za sakupljanje PM_{10} i $PM_{2.5}$. U: Valić F, Šega K, urednici. Zbornik radova Drugog hrvatskog znanstveno stručnog skupa Zaštita zraka '99; 22-25. rujna 1999; Šibenik, Hrvatska. Zagreb: HUZZ; 1999. str. 263-268.

[3] Marović G, Senčar J, Šega K, Bešlić I. Lebdeće čestice - doprinos ukupnoj beta aktivnosti zraka i brzini ekspozicijske doze. Gospodarstvo i okoliš 2001;55:134-136.

[4] Marović G; Senčar J, Šega K; Bešlić I. Ukupna beta aktivnost u zraku i oborini u odnosu na koncentraciju lebdećih čestica. Gospodarstvo i okoliš. 2004;12(65):594-596.

[5] U.S. Atomic Energy Commission Report, Health and Safety Laboratory. HASL-300. Procedures Manual. EML, New York: 1983.

TOTAL BETA ACTIVITY IN PM2.5 PARTICLE FRACTION IN ZAGREB ATMOSPHERE

Krešimir Šega, Ivan Bešlić, Gordana Marović, and Jasminka Senčar
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
ksega@imi.hr

Total beta activity of PM2.5 particle fraction at three sampling sites located at northern, southern and western parts of Zagreb urban area, was investigated. Samples were collected on daily basis during 2005 – 2007 period and their mass concentrations determined according to HRN EN 14907. Total beta activities of sample aliquots were measured by means of beta counter for low-level activities (GM multi-counter system RISØ) five days after sampling in order to avoid the influence of short half-life radionuclide. Counter calibration was performed by ^{40}K standard. The highest levels of total PM2.5 beta activity ($\mu Bq\ m^{-3}$) were measured at north, lower at the south, and the lowest at the sampling site situated at the western part of the town. Although the measurements were performed during three year period only, there is an obvious indication of possible negative trend of activities. Specific total beta activities ($Bq\ g^{-1}$) were at the same level for measuring sites located at southern and western parts of Zagreb, while those measured at north of the town were significantly higher. No indication of trend was found at any of sampling sites.

MJERENJE RADONA (^{222}Rn) U PROSTORIJAMA SREDNJE MEDICINSKE ŠKOLE "DR. ALI SOKOLI" U PRIŠTINI

Sehad Kadiri[1,2], Gëzim Hodolli[1,2], Shyqri Dumani[1], Xhevat Pllana[1,2] i Fadil Hasani[3]
[1]Institut medicine rada, Priština, Kosovo
[2]Univerzitet u Prištini, Medicinski fakultet, Priština, Kosovo
[3]Ministarstvo okoliša i prostornog uređenja, Priština, Kosovo
s_kdr@hotmail.com

UVOD

Prirodno zračenje je oduvijek bilo dio ljudske okoline. Njegove glavne komponente su kozmičko zračenje, zračenja prirodnih radionuklida u stijenama i tlu, te radioaktivne tvari u prehrani i zraku koji udišemo [1,2].

U suvremenom svijetu, sve više pažnje posvećuje se zaštiti od zračenja okruženja u kojem živimo, posebno kada se zna da koncentracije radona i njegovih potomaka sudjeluju u povećavanju kontaminacije okoliša u značajnim razmjerima, predstavljaju više od polovice od ukupnog udjela radioaktivnog zračenja. Radon je prirodni radioaktivni plin. Glavni izvor radona (^{222}Rn) je tlo koje sadrži radij (^{226}Ra), a ovaj alfa raspadom daje plinoviti radon. Radon se probija prema površini zemlje, izlazi i miješa se sa zrakom i nastavlja put prema atmosferi. Budući da zrak udišemo, s njime udišemo i radioaktivni plin radon [3,4]. Vrijeme poluraspada radona je 3,824 dana i raspadom nastaju kratkoživući potomci ^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{214}Po i dugoživući potomak ^{210}Pb, s vremenom poluraspada od 22,3 godine [3]. Gama linije potomaka predstavljaju radonske linije u fonu i one utječu na dizanje prirodnog fona pri mjerenju, dok ^{210}Pb može povećati površinsku kontaminaciju zemljišta [5]. Radon se raspada α - raspadom do polonija ^{218}Po, a energija emitirane α - čestice jest 5,49 MeV. Polonij je metal čiji se atomi lijepe za čestice prašine ili se talože na površinama s kojima dolaze u kontakt, a to su zidovi prostorija, nameštaj, ali i unutrašnjost pluća [8,9].

U ovom su radu prikazani rezultati mjerenja koncentracije radona u prostrijama Srednje medicinske škole "Dr. Ali Sokoli" u Prištini. Mjerenja su provedena na tri razine, u prizemlju u četiri učionice, te na prvom i drugom katu u po tri učionice.

METODOLOGIJA MJERENJA

Mjerenje radona provedeno je:

a) **Scintilacijskim ćelijama** (trenutna mjerenja); korišten je mjerač PRM-145 (AMES, Ljubljana, Slovenija).

Metoda se temelji na mjerenju ukupne aktivnosti alfa zračenja radona i njegovih kratkoživućih potomaka kao što su ^{218}Po i ^{214}Po. Ova mjerna tehnika prikladna je za dobivanje uvida o trenutnoj koncentraciji radona na nekom mjestu. Tamo gdje se tim mjerenjima ustanovi viša koncentracija radona, mjerenja se moraju obaviti i drugim metodama kako bi se dobio točan i pouzdan podatak. Rezultati temeljem kojih se daju preporuke o mjerama koje treba poduzeti kako bi se smanjila vrijednost izmjerenih koncentracija, kako bi bile u okviru međunarodno prihvaćenih standarda, zahtijevaju detaljnije analize.

b) **Kontinuirano mjerenje radona** (do 92 sata neprekidno) mjeračem Continous Radon Monitor (CRM Model 510). Mjerač radi na principu unutarnje ionizacijske komore. Kontinuirano mjerenje na jednoj lokaciji provodi se i preko 90 sati. Mjerač omogućuje i određivanje ostalih okolišnih parametara kao što su temperatura (*T*), relativna vlažnost zraka (*%*) i atmosferski tlak (u kPa).

Mjesto uzorkovanja

U prostorijama Srednje medicinske škole ″Dr.Ali Sokoli″ u Prištini mjerenja koncentracije radona provedena su na tri razine, u prizemlju i na prvom i drugom katu. U prizemlju su izabrane četiri učionice u kojima se održava nastava, na prvom i drugom katu po tri. Pomoću ručne pumpe u scintilacijske ćelije se na razini dišnih organa ubacuje zrak u ćelije. Nakon tri do pet sati ćelije se stavljaju u kontejner aparata PRM-145 i očitaju se rezultati. Kontinuirano mjerenje radona (više od 90 sata na jednoj lokaciji) provedeno je u istim učionicama i mjeračem radona CRM Model 510.

REZULTATI

Rezultati mjerenja koncentracije radona mjeračem PRM 145 prikazani su u Tablici 1. Osim koncentracije radona prikazana je i godišnja efektivna doza, koja je procijenjena pomoću sljedeće jednadžbe [6,7]:

$$H_{Rn} = EERC \times t \times DCF_{Rn}$$

H_{Rn} – godišnja efektivna doza radona i njegovih potomaka (mSv);
$EERC$ – ekvivalent ravnoteže koncentracije radona (Bq m^{-3});
t – vrijeme u satima izloženosti u godini dana (1200 sati godišnje), i
DCF_{Rn} – dozni faktor konverzije za radon.

Tablica 1. Rezultati mjerenja radona (Rn^{222}) mjeračem PRM 145

Mjesto uzimanja uzorka	Vrijeme uzorkovanja	Vrijeme početka mjerenja	Koncentracija ^{222}Rn (Bq m^{-3})	Godišnja efektivna doza (mSv)
Prizemlje	13:10	16:20	565 ± 26	2,44 ± 0,11
	-	-	581 ± 26	2,51 ± 0,11
	-	-	573 ± 26	2,48 ± 0,11
Prvi kat	09:50	14:30	229 ± 22	0,99 ± 0,10
	-	-	304 ± 22	1,31 ± 0,10
	-	-	267 ± 22	1,15 ± 0,10
Drugi kat	10:05	16:10	137 ± 11	0,59 ± 0,05
	-	-	214 ± 15	0,92 ± 0,06
	-	-	176 ± 13	0,76 ± 0,06

Rezultati mjerenja koncentracije radona (^{222}Rn) mjeračem CRM Model 510 kontinuiranom metodom uz praćenje ostalih parametrima, temperature (*T*), relativne vlage u zraku (*R.V.*), atmosferskog tlaka (*A.T.*) uz pripadajuću procijenjenu godišnju efektivnu dozu prikazani su na Tablici 2.

Tablica 2. Rezultati mjerenja radona mjeračem CRM Model 510

Mjesto uzimanja uzorka	Vrijednost	*R.V.* (%)	*A.T.* (kPa)	*T* (°C)	Koncentracija ^{222}Rn (Bq m^{-3})	Godišnja efektivna doza (mSv)
Prizemlje	Minimum	65	88	23	83	0,32
	Maksimum	69	88	27	164	0,71
	Srednjak	67	88	25	116	0,50
Prvi kat	Minimum	53	89	29	53	0,23
	Maksimum	63	90	32	156	0,67
	Srednjak	58	89	30	91	0,39
Drugi kat	Minimum	48	88	28	37	0,16
	Maksimum	52	89	32	111	0,48
	Srednjak	49	88	30	70	0,30

R.V. – relativna vlaga u zraku (%), *A.T.* – atmosferski tlak (kPa), *T* – temperatura (°C)

Slika 1. Usporedni prikaz vrijednosti koncentracije radona dobivenih različitim mjernim metodama

Na Slici 1 usporedno su prikazani rezultati mjerenja koncentracija aktivnosti radona provedenih pomoću obje metode, mjerenjem trenutne koncentracije aktivnosti i kontinuiranim mjerenjem.

ZAKLJUČAK

Na osnovi rezultata, možemo zaključiti da su vrijednosti koncentracije radona mjerenjem metodom scintilacijskim ćelijama mjeračem PRM 145, trenutno, veće od vrijednosti dobivenih metodom kontinuiranog dužeg mjerenja. Povećane vrijednosti vidljive su u prizemlju. Vrata i prozori učionice bili su zaključani najmanje četiri dana prije uzimanja uzorka zraka.

Trenutno izmjerene nešto veće vrijednosti koncentracije radona mjeračem PRM 145 odraz su nakupljenog radona u zatvorenom prostoru. Srednje vrijednosti godišnje efektivne doze mjerenjem metodom scintilacijskim ćelijama s mjeračem PRM 145 kreću se između $0{,}76 \pm 0{,}06$ mSv i $2{,}48 \pm 0{,}11$ mSv. Ova mjerna tehnika je dovoljno prikladna i koristi se za dobivanje uvida o koncentraciji radona u određenom trenutku. Detektiranje prostora u kojem su trenutnim mjerenjima izmjerene veće koncentracije aktivnosti radona, uvod je u sustavno provođenje kontinuiranih mjerenja koncentracije aktivnosti radona u tim prostorima.

Ponovljena mjerenja kontinuiranom metodom mjeračem CRM Model 510, rezultirala su nižim vrijednostima koncentracije radona i manjom srednjom godišnjom efektivnom dozom, koja se kretala između 0.30 mSv i 0.50 mSv. Treba napomenuti da su vrata i prozori učionica gdje su provođena mjerenja bila zaključana prije instaliranja mjerača.

Za procjenu godišnje efektivne doze od udisanja radona i radonovih potomaka pokazala se prikladnija metoda kontinuiranog mjerenja koncentracije aktivnosti radona.

Prikazani rezultati mjerenja koncentracije radona i procjene pripadajućih godišnjih efektivnih doza ne premašuju vrijednosti koncentracija radona i pripadajućih godišnjih efektivnih doza definiranih međunarodnim preporukama i standardima [10].

Zahvala

Ovaj rad je podržan od Instituta medicine rada, Obiliq, Kosovo. Autori žele zahvaliti menadžmentu ovog Instituta.

REFERENCE

[1] UNSECAR. 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation in Report to the General Assembly with Scientific Annex, Vol. 1. United Nations. New York 2000

[2] Baxter M S. Environmental Radioactivity: A perspective on industrial contributions. IAEA Bulletin, 1993;35(2):33-8.

[3] Budnitz R G. Radon-222 and its Daughter. Health Phys 1974;26:145-163.

[4] Durrani S A, Ilic R. Eds. Radon Measurements by Etch Track Detectors: Applications in Radiation, Protection, Earth Science, and the Environment. Singapore: World Scientific. 1997.

[5] Assessment of indoor radon doses received by the students in the RPD 2010; 142(2-4):339-46

[6] Vaupotič J. Indoor Radon in Slovenia. Nucl Technol Radiat Protect 2003;18(2):36-43

[7] NSCEAR 2000 REPORT Vol. I Exposures from natural radiation sources ANNEX B, United Nations. New York. 2000; p107

[8] ICRP Publication No. 65 Protection against ^{222}Rn at home and at work. Ann. ICRP Oxford: Paragon Press 1993.

[9] Morgan V, Samet JM. Radon daughter exposures of New Mexico U miners, 1967-1982. Health Phys, 1986;50(5):656-62.

[10] International Atomic Energy Agency, Safety Standard Series, Occupational Radiation Protection, No. RS-G-1.1. Vienna.

MEASUREMENT OF RADON (^{222}Rn) IN THE HIGH SCHOOL OF MEDICINE "DR. ALI SOKOLI" IN PRISHTINA

Sehad Kadiri[1,2], Gëzim Hodolli[1,2], Shyqri Dumani[1], Xhevat Pllana[1,2] and Fadil Hasani[3]
[1]Institute of Occupational Medicine, Radiation Protection Service, Prishtina, Kosovo
[2]University of Prishtina, Faculty of Medicine, Prishtina, Kosovo
[3]Ministry of Environment and Spatial Planning, Prishtina, Kosovo
s_kdr@hotmail.com

Measurements of radon concentration (^{222}Rn) were performed in the largest High School of Medicine "Dr. Ali Sokoli" in Prishtina. We choose four locations (classrooms) at ground level, three at first and three on the second floor. In the same premises, the measurements were performed with two methods: using a scintillation cell and a continuous method. The maximum value of radon concentration, measurements with scintillation cells, were obtained by the ground level moving to 573 ± 26 Bq m^{-3}, while the minimum value of 176 ± 11 Bq m^{-3} was obtained in the second floor. The maximum value of radon concentration measurements with the continuous method was 116 Bq m^{-3} in ground level, and the minimum value was 70 Bq m^{-3}. Based on these results, we calculated annual effective dose, which ranges between 0.76 ± 0.06 mSv and 2.48 ± 0.11mSv, by scintillation cells. Whereas, the annual effective dose measuring by continuous method was between 0.30 mSv and 0.50 mSv. Based on those results, we conclude that radon concentration and annual effective doses were within accepted international standards.

RADON MEASUREMENTS IN BUILDINGS WITH HIGH RADON CONCENTRATIONS

Peter Jovanovič
Institute of Occupational Safety, Ljubljana, Slovenia
peter.jovanovic@zvd.si

INTRODUCTION

Regarding radiation protection regulations in Slovenia [1] measurements of natural radiation in public institutions have to be done by accredited laboratory [2] to determine those with elevated radon concentrations. Ministry of Health started measurements of radon concentrations in schools and kindergartens twenty years ago. Almost all kindergartens and schools were included in monitoring [3]. In kindergartens and schools with very high radon concentrations measurements were repeated and remediate if needed.

Monitoring is continuing and in last five years 330 measurements of radon concentrations in public buildings by track each detectors were done. Radon concentrations in thirty five kindergartens and schools and twelve other public institutions were higher than proposed by regulations, 400 Bq/m^3 for schools and kindergartens and 1000 Bq/m^3 for other institutions. For those institutions special monitoring was carried out. We did thirty five measurements by electronic devices in the period of one week to determine radon and radon progeny concentrations. In case of high radon concentration in rooms also radon concentrations in cracks and water or electricity installations in the basement were measured. In special cases radon concentration in soil near building was measured. After measurements dose assessment was done and remediation actions proposed.

MATERIAL AND METHODS

Regarding the program determined by the Ministry of Health, measurements of radon and/or daughter concentrations on different locations were taking into account. First measurements were always performed by track each detectors. After the inspection of the building one or more detectors were placed in rooms for the period of at least one month. After the exposure period detectors were sending back for analysis. If radon concentration in room exceeded 400 Bq/m^3, the measurement in the same

room was repeated next year. Radon and radon progeny concentrations were measured by electronic devices for the period of one week in the same room. Devices were put on place away from windows and doors.

If radon concentration measured by track each detector and radon and daughter concentrations measured by electronic devices were higher than regulated by law, measurements of radon concentrations in cracks, holes, installations, shafts etc. were performed. Tube was put in the crack or hole and isolated (Figure 1). Measuring period was from 5 to 30 minutes, depending from the device and strength of the source.

Figure 1. Radon in crack

Figure 2. Radon in soil

In last two years also measurements of radon concentration in soil nearby the building were implemented (Figure 2). The idea was to find possible connection between radon concentration in soil and in buildings. The stick was beat in the soil up to the depth of 80 cm and connected through tube with the device. Measuring period was from 5 to 30 minutes, depending from the device and strength of the source.

After the set of three year measurements possible remediation actions were suggested. Period of three years was used because more data are available and it is easily define rooms for remediation, while some buildings are very small and have only one room in the basement, some buildings have more rooms in the basement and there is no need to remediate complete basement.

Long-term radon concentrations in buildings were measured by passive track each detectors made by Gammadata, Sweden, using a detection film made of CR39/PADC plastic mounted inside a closed container. Container is manufactured from an electrically conducting material to avoid effects of static buildup. The closed container permits only radon gas to enter. Thoron gas can not enter due to its short half-life.

For continuous measurements of radon concentrations electronic devices RAD7 (Durridge, USA), System 30 (Scintrex, Canada) and Alphaguard (Germany) were used. For continuous measurements of radon progeny concentrations electronic devices System 30 (Scintrex, Canada), WLM 30 (Scintrex, Canada) and Doseman Pro (Sarad, Germany) were used. Measuring period for radon progeny concentration measurement was 30 minutes and for radon concentration measurement was one hour.

RESULTS

In the period from 2006 to 2010 three hundred thirty (330) measurements of radon concentrations in 101 schools and kindergartens and 26 other public institutions by track each detectors were done [4-7]. In schools and kindergartens 233 radon concentration measurements were done, in 81 cases radon concentrations were higher than 400 Bq/m^3. In other public institutions 97 radon concentration measurements were done and in 31 cases radon concentrations were higher than 1000 Bq/m^3. Regulated values were increased in thirty five kindergartens and schools and twelve other public institutions.

Measuring locations with elevated radon concentrations are presented in Figure 3, based on the map of the radon potential in soil measurements in Slovenia [8]. Locations of radon concentrations for kindergartens and schools are presented in black circles and locations for other public institutions are presented in pink circles. Equilibrium factor F determined by electronic devices ranged from 0.20 up to 0.82, mean value was 0.54, which is higher than 0.4, usually used for living conditions. The reason for higher equilibrium factor is that we did the major part of measurements in autumn and winter period.

In ten kindergartens or schools and four other institutions radon concentrations in cracks or holes were measured. In five of them also radon concentration in soil near the building was measured (Table 1, Figure 3). Radon concentrations in rooms are presented in black rectangles, radon concentrations in cracks are presented in blue rectangles and radon concentrations in soil are presented in pink rectangles.

Regarding the geology measuring locations are located in typical karst area (locations 1 and 2) with limestone and marl and in central and southern part of Slovenia (locations 3, 4, 6, 7 - 10) where the major geological basement forms marl and conglomerate.

Figure 3. Measuring locations with elevated radon concentrations

There are another two interesting locations, OŠ Prevalje and MORS Todraž. OŠ Prevalje is located on the slag from steel industry in the vicinity, which is the main reason for high radon concentrations. MORS Todraž is located on the uranium mine tailings and increased radon concentrations were expected. We can see good correlation between radon concentrations in soil, cracks and rooms for the first five locations (Table 1).

Table 1. Radon concentrations in rooms, cracks or holes and in soil

		Radon concentration (Bq/m^3)		
No	Location	Room	Crack or hole	In soil
1	OŠ Komen	2030 ± 150	88000 ± 5000	226000 ± 15000
2	VVO Sežana	1300 ± 100	13000 ± 1000	150000 ± 8000
3	VVO Muljava	7430 ± 400	59000 ± 3000	101000 ± 7000
4	OŠ Prevole	2410 ± 160	11000 ± 1000	82000 ± 5000
5	OŠ Prevalje	2900 ± 180	40000 ± 2500	75000 ± 5000
6	OŠ Bučka	950 ± 90	3600 ± 300	
7	OŠ Dvor	530 ± 100	76600 ± 5000	
8	VVO Vavta vas	1800 ± 150	3600 ± 350	
9	OŠ Godovič	475 ± 50	6500 ± 600	
10	GŠ Ribnica	2350 ± 150	550 ± 100	
11	Hosp. Ljubljana	5520 ± 70	16000 ± 1500	
12	Hosp. Idrija	1190 ± 100	1000 ± 200	
14	Train st. Divača	1290 ± 120	5000 ± 500	
14	MORS Todraž	950 ± 90	168000 ± 10000	

From other locations we can eliminate OŠ Dvor and GŠ Ribnica. OŠ Dvor is the only new building from presented, all other building on the Table 1 are older. There is a strong source of radon under the basement, but the floor is good isolated and radon can not enter the building. GŠ Ribnica has a classroom in the cellar about two meters below the surface. The floor was remediated three years ago and we could not find any cracks in the floor or on the contacts floor-walls. Probably there are cracks in the walls.

CONCLUSION

Concerning results of radon concentration measurements we can conclude, (i) karst area and central southern part of Slovenia with limestone, marl and conglomerate as a main geological structure represent a strong radon source, (ii) old buildings with cracks in the floor make a great possibility to radon entering the rooms, and finally (iii) remediation actions are urgent in almost all old schools and kindergartens on the area presented.

REFERENCES

[1] Ionizing Radiation Protection and Nuclear Safety Act. Off. Gaz. of the RS 102/2004.

[2] Rules on the monitoring of radioactivity. Off. Gaz. of the RS 20/2007.

[3] Vaupotič J. Systematic indoor radon and gamma-ray measurements in Slovenian schools. Health Phys 2000;78(5):559-562.

[4] Jovanovič P. Systematic survey of working and living environment, ZVD, 2006. (in Slovene)

[5] Jovanovič P. Systematic survey of working and living environment, ZVD, 2008. (in Slovene)

[6] Jovanovič P. Systematic survey of working and living environment, ZVD, 2009. (in Slovene)

[7] Jovanovič P. Systematic survey of working and living environment, ZVD, 2010. (in Slovene)

[8] Vaupotič J. Radonski potencial v tleh na območjih s povišanimi koncentracijami radona v zaprtih prostorih, IJS-DP-9694-1, 2007.

RADON U KUĆAMA VIROVITIČKO-PODRAVSKE ŽUPANIJE

Maja Varga Pajtler[1], Dijana Jurišić[2], Igor Miklavčić[1], Marina Poje[1], Vanja Radolić[1], Branko Vuković[1] i Ivana Ivković[1]
[1]Sveučilište J.J.Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku, Osijek
[2]Osnovna škola Gradina, Gradina
mvarga@fizika.unios.hr

UVOD

Radon (^{222}Rn) je radioaktivni plemeniti plin bez boje, mirisa i okusa, a nastaje alfa raspadom radija (^{226}Ra), koji je sastavni dio tla. Atomi radona koji izađu iz tla prenose se difuzijom kroz prostor, ulaze i atmosferu i raspadaju se. Advekcijom uslijed razlike tlakova između građevine i tla oko temelja radon ulazi u kuće i zgrade. Radon i njegovi kratkoživući potomci u atmosferi daju najveći doprinos izloženosti prirodnoj radioaktivnosti.

Udisanje kratkoživućih potomaka radona ^{222}Rn i torona ^{220}Rn te njihovo taloženje na stijenkama dišnih putova glavni su uzrok izloženosti pluća zračenju. Izloženost je posljedica alfa čestica koje emitiraju radionuklidi, imaju vrlo kratak doseg (desetke mikrometara), a uzrokuju različite gustoće ionizacije i pobuđenja duž svog puta. Uslijed ionizacije tkiva, povećava se rizik nastanka raka pluća ukoliko dođe do udisanja veće količine radona kroz duži vremenski period [1].

Na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku izvodi se znanstvenoistraživački projekt: "Radioaktivnost u okolišu; radon". Jedan od zadataka projekta je mjerenje koncentracije radona u kućama, a u ovom su radu prikazani rezultati mjerenja radona u kućama Virovitičko-podravske županije. Mjerenja su provedena u razdoblju između listopada 2003. i veljače 2009. godine.

MATERIJAL I METODE

Mjerenje koncentracije radona i njegovih potomaka rađeno je pomoću detektora nuklearnih tragova LR-115 (proizvođača Kodak-Pathe, France), koji su bili izloženi zračenju radona.

Cilindrična plastična posuda promjera 11 cm i visine 7 cm pokrivena je filter papirom površinske gustoće 0,078 kg/m^2. Na dno posude, s unutarnje strane, postavljen je tzv. difuzni detektor LR-115, a s vanjske

strane posude postavljen je tzv. vanjski detektor LR-115. Vanjski detektor registrira ukupni broj alfa-čestica koje emitira radon i njegovi potomci, dok difuzni detektor registrira samo tragove alfa-čestica koje emitira radon [2,3].

Nakon što su bili izloženi zračenju, detektori su 120 minuta jetkani u 10 %-tnoj otopini NaOH na temperaturi 60 °C, a zatim su izbrojani tragovi nastali raspadom radona.

Na temelju dobivenog broja tragova na filmu računa se koncentracija radona u zraku, c_0, na sljedeći način:

$$c_0 = k \cdot D_0 \qquad (1)$$

pri čemu je k koeficijent osjetljivosti osobe koja je vršila brojanje, a D_0 broj tragova na otvorenom filmu po jednom danu izlaganja.

Korištena metoda mjerenja koncentracije radona pomoću dva filma LR-115 omogućava i procjenu ravnotežnog faktora, F, koji se definira kao omjer ravnotežne koncentracije c_{eq} i stvarne koncentracije aktivnosti radona c, a karakterizira neravnotežu radonovih potomaka i radona [4,5]. Također, pomoću ravnotežnog faktora moguća je i bolja procjena efektivne doze koja potječe od radona i njegovih potomaka. Za gustoće tragova D na difuznom i D_0 na otvorenom filmu računa se ravnotežni faktor kao

$$F = a\frac{D}{D_0} + b \qquad (2)$$

pri čemu su parametri $a = 0{,}5$, $b = -0{,}53$. Dobivena aritmetička sredina za ravnotežni faktor u Virovitičko-podravskoj županiji je 0,8. Prosječni ravnotežni faktori, kao i srednje vrijednosti, minimalne i maksimalne vrijednosti koncentracije radona u Virovitičko - podravskoj županiji prikazane su u Tablici 1.

REZULTATI

Dobivene vrijednosti koncentracije radona u kućama Virovitičko-podravske županije bile su u području od 12,7 do 187,7 Bqm^{-3}. Na temelju tih podataka izrađen je zemljovid koncentracije radona za Virovitičko - podravsku županiju, koji je prikazan na Slici 1, gdje je je Županija podijeljena na općine (prema teritorijalnom ustroju Republike Hrvatske).

Slika 2 prikazuje podatke o koncentraciji radona u Virovitičko-podravskoj županiji podijeljenoj na kvadrate dimenzija 10 km × 10 km, u skladu s preporukama JRC-a (Joint Research Centre) te prema projekcijskom sustavu LAEA (Lambert Azimuthal Equal Area).

Tablica 1. Srednje, minimalne i maksimalne vrijednosti koncentracije radona u općinama i gradovima Virovitičko-podravske županije te srednji ravnotežni faktor

Općina / Grad	Broj mjerenja	Srednja vrijednost (Bq m^{-3})	Minimalna koncentracija	Maksimalna koncentracija	Ravnotežni faktor
Crnac	1	37,8			
Pitomača	8	40,9	27,1	101,4	0,7
Lukač	10	44,8	21,5	68,2	0,7
Voćin	5	44,9	24,3	80,7	0,6
Slatina	9	45,9	15,7	76,5	1,0
Špišić Bukovica	6	44,9	12,8	82,6	0,5
Orahovica	6	37,7	9,3	72,0	2,0
Suhopolje	12	47,0	16,6	94,3	0,6
Virovitica	21	54,0	19,3	135,9	0,7
Čađavica	1	59,7			0,8
Gradina	9	63,2	22,0	187,5	0,6
Nova Bukovica	5	60,9	5,7	138,6	1,6
Čačinci	7	91,7	22,6	187,7	0,6
Sopje	1	22,9			0,8
Mikleuš	-				
Zdenci	-				

Slika 1. Zemljovid koncentracije radona za Virovitičko-podravsku županiju prema teritorijalnom ustroju RH

Slika 2. Zemljovid koncentracije radona za Virovitičko-podravsku županiju prema projekcijskom sustavu LAEA

Poznavajući koncentraciju radona c i ravnotežni faktor F za radon i potomke, može se procijeniti srednji godišnji efektivni dozni ekvivalent H, kao[1,4]

$$H = (k_1 + k_2 F)cT \qquad (3)$$

pri čemu su konverzijski faktori $k_1 = 0{,}17$ nSv (Bq/m^3)$^{-1}$ h^{-1} i $k_2 = 9$ nSv (Bq/m^3)$^{-1}$ h^{-1}, a T = 0,8·365,3·24 h = 7014 h je prosječno vrijeme boravka pojedinca u kući, tj. vijeme izlaganja zračenju radona. Za stanovnike Virovitičko-podravske županije srednji godišnji efektivni dozni ekvivalent iznosi H = 1,5 mSv.

ZAKLJUČAK

Koncentracija radona u kućama Virovitičko-podravske županije mjerena je metodom s dva detektora nuklearnih tragova LR-115. Dobivene vrijednosti bile su u području od 5,7 do 187,7 Bq m^{-3}, s aritmetičkom sredinom od 52,0 Bqm^{-3} i geometrijskom sredinom od 42,4 Bq m^{-3}.

Općina s najnižom prosječnom izmjerenom koncentracijom radona je Sopje s 22,9 Bq m^{-3}, dok je općina Čačinci općina s najvišom prosječnom radonskom koncentracijom od 91,7 Bq m^{-3}.

Srednji godišnji efektivni dozni ekvivalent koji potječe od radona i njegovih potomaka za stanovnike Virovitičko-podravske županije iznosi H_E = 1,5 mSv, dok osoba koja boravi u kućanstvu s najvećom izmjerenom koncentracijom radona primi H_E = 9,0 mSv.

LITERATURA

[1] United Nations Scientific Committees on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR): Source Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report 1993, New York, 1993

[2] Planinić J, Faj Z, Radolić V, Šmit D, Faj D. Indoor Radon Dose Assessment for Osijek. J Environ Radioact 1999;44:97-106.

[3] Radolić V, Vuković B, Stanić D, Katić M, Faj Z, Šuveljak B, Lukačević I, Faj D, Lukić M, Planinić J. National survey of indoor radon levels in Croatia. J Radioanalyt Nucl Chem 2006;269(1):87-90.

[4] Faj Z, Planinić J. Dosimetry of the radon and its daughters by two SSNT detecrots. Radiat Prot Dosim 1991;35:265-268.

[5] Planinić J, Radolić V, Faj Z, Šuveljak B. Radon equilibrium factor and aerosols. Nucl Instr Meth1997;A396:414-417.

RADON IN THE HOUSES OF VIROVITICA AND PODRAVINA COUNTY

Maja Varga Pajtler[1], Dijana Jurišić[2], Igor Miklavčić[1], Marina Poje[1], Vanja Radolić[1], Branko Vuković[1] and Ivana Ivković[1]
[1]Department of Physics, University of Osijek, Osijek, Croatia
[2]Elementary School Gradina, Gradina, Croatia
mvarga@fizika.unios.hr

^{222}Ra is the gaseous radioactive product of the decay of radium isotope ^{226}Ra which is present in soil. Radon atoms that are released from the ground are transported by diffusion and then released in the atmosphere. Radon entries into buildings by advection that is driven by the pressure difference between the building and the ground around the foundation. The aim of this study was to measure radon concentrations in the houses of Virovitica and Podravina county.

The measurements were performed by means of two passive track detectors LR-115 (Kodak-Pathe, France), one of which (the open detector) detected total number of alpha-particles of radon and its short-lived progeny, while the other (diffusion detector) registerd tracks only of alpha particles emitted by radon. After being exposed to radiation, the LR-115 detectors were etched in 10 % NaOH aqueous solution at 60 ºC for 120 minutes and the detector tracks were counted.

Radon concentrations in air were determined according to equation (1), where D_0 was the number of tracks per one day of exposure of the open detector and k is the sensitivity coefficient od the person that counted the tracks. For the track densities D and D_0 of the open and diffusion detectors, respectively, the equilibrium factor was calculated according to equation (2), with the parameters $a = 0{,}50$, and $b = -0{,}53$. Obtained value for the equilibrium factor was 0,85. Measurements gave radon concentrations in the range of 5.7 – 187.7 Bq m^{-3}. Average annual effective radon dose for population of Virovitica and Podravina county is 1,5 mSv.

IMPLEMENTACIJA PROTOKOLA ZA MJERENJE RADONA U KUĆAMA U RH NA PRIMJERU BARANJE

Vanja Radolić, Igor Miklavčić, Marina Poje, Denis Stanić, Maja Varga Pajtler i Branko Vuković
Odjel za fiziku Sveučilišta u Osijeku, Osijek
vanja@fizika.unios.hr

UVOD

Radon (^{222}Rn) je plemeniti, radioaktivni plin koji nastaje radioaktivnim raspadom radija (^{226}Ra) uz emisiju alfa čestice. Poznato je da radon i njegovi kratkoživući potomci daju najveći doprinos efektivnoj dozi stanovništva od prirodnih izvora zračenja [1]. Pritom, na otvorenom zbog prirodne cirkulacije zraka i disperzije, radon ne predstavlja opasnost za zdravlje opće populacije. Međutim, duže ekspozicije povišenim razinama radona i njegovih potomaka u zatvorenim ili loše ventiliranim prostorima (pa i kućama) značajno povećavaju rizik za pojavu plućnog karcinoma ne samo među rudarima već i kod opće populacije [2]. Stoga su mnoge države učinile značajan napor u identifikaciji područja s povišenom radonskom koncentracijom [3], a neke od njih su i nacionalne radonske programe inkorporirale u pravni sustav dajući zakonske odredbe usmjerene na zaštitu od radona [4,5]. Mnoge europske zemlje su provele mjerenja radona u kućama i tlu na nacionalnom nivou, a rezultati su sumirani u publikaciji Istraživačkog centra Europske komisije (ICEK) [6]. Zbog činjenice da radon u kućama može značajno varirati u kratkom vremenu, izrada radonskog zemljovida postaje složena te jako ovisi o primarnom cilju istraživanja i primijenjenoj metodologiji mjerenja. Istraživačka grupa za radon s Odjela za fiziku Sveučilišta u Osijeku je nakon sustavnih istraživanja radona u kućama u RH [7] provedenih s ciljevima procjene srednje godišnje koncentracije radona u kućama, određivanja postotka kućanstava u kojima koncentracija radona prelazi preporučene vrijednosti (200 Bq m^{-3} odnosno 400 Bq m^{-3}) te identifikacije područja s povišenom radonskom koncentracijom, izradila protokol za mjerenje radona u kućama.

MATERIJALI I METODE

Teritorij RH je podijeljen u kvadratna polja veličine 10×10 km^2 s koordinatama definiranim GISCO Lambertovom azimutnom projekcijom

jednakih površina s centrom projekcije u 48° N, 9° E. Ova projekcija se koristi u projektu izrade Europskog radonskog zemljovida u organizaciji i koordinaciji Grupe za monitoring radioaktivnosti pri Institutu za okoliš i održivost Združenog istraživačkog centra Europske komisije (*Radioactivity Environment Monitoring Group of Institute for Environment & Sustainability of Joint Research Centre of European Commission*), a u koji je uključena i naša istraživačka grupa. U svakom takvom polju se lokacije odabiru nasumično, a broj mjernih mjesta unutar polja određuje se brojem stanovnika koji tu žive uz unaprijed definiran kriterij (npr. 1 mjerna lokacija na svakih 300, 500 ili 1000 stanovnika). Pritom se vodi računa da minimalan broj mjernih lokacija unutar polja ne bi trebao biti manji od 3. Detektori nuklearnih tragova se izlažu godinu dana u jednoj od prostorija u kojoj stanari najviše borave (dnevna ili spavaća soba) na najnižoj razini boravka (najčešće prizemlje). Općenito, treba izbjegavati postavljanje detektora u kuhinjama, kupatilima, pomoćnim prostorijama kako zbog malog vremena boravka stanara u njima tako i zbog većeg broja radioaktivnih aerosola (kuhinje) ili povećane vlažnosti zraka (kupatila) koje mogu utjecati na kvalitetu mjerenja i osjetljivost detektora. Treba posebno voditi evidenciju o postojanju podrumskih prostorija neposredno ispod prostorije s postavljenim detektorima. Detektor ne bi trebalo pomicati za vrijeme izlaganja pa ga, shodno tome, treba postaviti na mjesto na kojem neće smetati u svakodnevnim aktivnostima ukućana. Pritom treba voditi računa da se detektor ne postavlja u blizini prozora, ventilatora ili klima uređaja. Nadalje, treba ga postaviti barem 30 cm daleko od vanjskog zida kuće/stana te barem 10 cm daleko od ostalih objekata u stanu. Shodno tome, optimalan položaj detektora je na ormaru na 2 m visine u dnevnoj ili spavaćoj sobi.

Područje Baranje obuhvaća 18 kvadratnih polja veličine 10×10 km^2 (od kojih je 12 naseljeno). U svakom od ovih 12 naseljenih polja, lokacije su odabrane slučajno te smo, uz pristanak stanara (koje smo prethodno telefonski kontaktirali), u prizemnom stanu postavili radonske detektore. Istraživanje je provedeno u periodu srpanj 2009. – srpanj 2010., a ukupno su bila postavljena 142 detektora.

Mjerenje koncentracije radona u zraku u kućama izvedeno je pasivnom metodom s odvojivim (engl. *strippable*) detektorima nuklearnih tragova LR-115 tip II (proizvođač Kodak-Pathé, Francuska). Cilindrični plastični nosač detektora, RadonOS-Z (posuda promjera 11 cm i visine 7 cm), prekriven je na vrhu filtar papirom površinske gustoće 0,078 kg/m^2.

Unutar nosača se nalazi jedan film LR-115 tip II, veličine 2×3 cm^2, koji služi kao difuzni detektor. Drugi je film pričvršćen na vanjsku stijenku plastičnog nosača i služi kao otvoreni detektor. Pritom, difuzni detektor bilježi samo tragove alfa čestica emitirane od radona, dok otvoreni detektor bilježi ukupan broj alfa čestica koje potječu i od radona i od njegovih kratkoživućih potomaka. Ova metoda s dva detektora omogućava i određivanje ravnotežnog faktora, *F* između radona i njegovih kratkoživućih potomaka u zraku, kao i bolju procjenu primljene radonske doze zračenja [8].

Nakon izlaganja, detektori su kemijski obrađeni (jetkani) u 10 % vodenoj otopini NaOH na 50 ºC u trajanju od 180 minuta, a potom su tragovi brojani pomoću brojača iskri, AIST-2V.

Određivanje efektivne doze primljene od radona i njegovih kratkoživućih potomaka temelji se na epidemiološkom modelu opisanom u ICRP-65 publikaciji [9], a koja daje konverzijske faktore između efektivne doze i ekspozicije, tj. izloženosti.

REZULTATI

Dobiveni podaci su statistički obrađeni za svaki kvadrant i izračunata je aritmetička sredina i pripadna standardna devijacija, geometrijska sredina s pripadnom geometrijskom standardnom devijacijom, medijan, minimum i maksimum te broj mjernih lokacija u kvadrantu. Na Slici 1 su prikazane aritmetičke sredine svih radonskih koncentracija na lokacijama koje se nalaze unutar kvadranta

Pojedinačne izmjerene vrijednosti koncentracije radona u kućama Baranje bile su u području od 6 do 355 Bq m^{-3}, s aritmetičkom sredinom od 88 Bq m^{-3} i pripadnom standardnom devijacijom od 69,0 Bq m^{-3}. Srednja relativna pogreška mjerenja koncentracije radona iznosila je 6,9 %. Srednja geometrijska sredina iznosi 67,2 Bq m^{-3} uz pripadnu geometrijsku standardnu devijaciju od 2,1 Bq m^{-3}. U usporedbi s prosječnom koncentracijom radona u kućama u RH [7] koja iznosi 68 Bq m^{-3}, prosječna koncentracija radona u kućama Baranje je oko 20 % iznad prosjeka. Radon u kućama Baranje distribuiran je prema log-normalnoj distribuciji što je testirano i potvrđeno pomoću statističkog χ^2-testa ($\chi^2 = 0{,}913 < \chi^2_{0{,}05} = 15{,}507$ za 8 stupnjeva slobode).

Slika 1. Zemljovid koncentracije radona u kućama Baranje; istraživanje provedeno u razdoblju od srpnja 2009. do srpnja 2010.

Histogram dobivenih empirijskih frekvencija je prikazan na Slici 2. Pritom se procjenjuje da u 6,7 % kuća, koncentracija radona iznosi između 200 i 400 Bq m^{-3}, dok u 1,0 % kuća u Baranji koncentracija radona iznosi više od 400 Bq m^{-3}. Uz pretpostavku da osoba 60 % svog vremena provodi u kući te uz srednje vrijednosti radonske koncentracije od 88 Bq m^{-3} i ravnotežnog faktora od 0,53, srednji godišnji efektivni dozni ekvivalent koji potječe od radona i njegovih kratkoživućih potomaka za stanovnike Baranje iznosi H_E = 1,5 mSv. Međutim, na lokaciji u Popovcu gdje je izmjerena koncentracija radona od 321 Bq m^{-3} i uz ravnotežni faktor od 0,79, osoba godišnje primi efektivni dozni ekvivalent od 8,2 mSv.

Slika 2. Histogram empirijskih frekvencija po logaritmima radonskih koncentracija uz prilagođenu krivulju Gaussove distribucije

Zahvala

Autori zahvaljuju Državnom zavodu za zaštitu od zračenja na financijskoj podršci prilikom jednogodišnjeg radonskog monitoringa Baranje.

LITERATURA

[1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionising Radiation. Volume I: Sources. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with scientific annexes. United Nations, New York. 2000.

[2] Darby S, Hill D, Auvinen A, Barros-Dios JM, Baysson H, Bochicchio F, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Br Med J 2005; 330:223-226.

[3] Kendall GM, Green BMR, Miles JCH, Dixon DW. The development of the UK radon programme. J Radiol Prot 2005;25:475-492.

[4] Froňka A, Hůlka J, Thomas J. Radon programme in the Czech Republic-experience and further research. Int Congress Series 2005;1276:379-380.

[5] Proposal for a New Radon Programme for Sweden, The Swedish Radon 2000 Commission's Report. SOU 001:7, The Swedish Government Offices, Stockholm, Sweden 2001.

[6] Dubois G. An overview of radon surveys in Europe. Institute for Environment and Sustainability of the Directorate General Joint Research Centre of the European Commission; Office for Official Publication of the European Communities, 2005. ISBN 92-79-01066-2

[7] Radolić V, Vuković B, Stanić D, Katić M, Faj Z, Šuveljak B, Lukačević I, Faj D, Lukić M, Planinić J. National survey of indoor radon levels in Croatia, J Radioanal Nucl Chem 2006;269:87-90.

[8] Planinić J, Radolić V, Faj Z, Šuveljak B. Radon equilibrium factor and aerosols, Nuclear Instr Method Phys Res A 1997;396:414-417.

[9] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection against Radon-222 at Home and at Work. Pergamon Press, ICRP Publication 65. 1994.

PROTOCOL IMPLEMENTATION FOR RADON CONCENTRATION MEASUREMENTS IN HOUSES IN CROATIA – BARANJA CASE

Vanja Radolić, Igor Miklavčić, Marina Poje, Denis Stanić, Maja Varga Pajtler and Branko Vuković
Department of Physics, University of Osijek, Osijek, Croatia
vanja@fizika.unios.hr

The newly established protocol for radon measurements in homes was implemented on the radon survey in houses of Baranja region which was carried out from July 2009 until July 2010. The radon measurements were performed with passive track etched detectors. The method consists of cylindrical plastic vessel and two strippable LR-115 films type II (Kodak-Pathé, France). This method with two detector films enables the estimation of equilibrium factor as well.

Croatian territory is divided in 10×10 km^2 cells which were part of a reference grid map which is used in a preparation of European radon concentration map. Detector locations were randomly chosen inside each grid and their number was determined by the number of inhabitants inside (one locations per 350 inhabitants). Radon detectors were exposed for a year in a living room or a bedroom away from strong ventilation and 30 cm from side walls (usually on closet at height of 2 m). After the exposure, detectors were collected and etched in 10 % NaOH aqueous solution at 50 ºC for 180 minutes. The tracks were automatically counted using spark counter AIST-2V.

The obtained results were in the range from 6 to 355 Bq m^{-3} with arithmetic mean of 88 Bq m^{-3} and standard deviation of 69.0 Bq m^{-3}. The geometric mean was 67.2 Bq m^{-3} while the geometric standard deviation was 2.1 Bq m^{-3}. The statistical χ^2–test showed that the empirical frequency distribution for radon in houses of Baranja region belonged to the log-normal distribution. The percentage of houses with radon concentrations between 200 and 400 Bq m^{-3} was 6.7 % and 1.0 % of houses have radon concentration above 400 Bq m^{-3}.

The annual effective dose from the indoor radon and its short-lived progenies for the inhabitants of Baranja region (for the average equilibrium factor of 0.53 and occupancy factor of 0.6) was 1.5 mSv.

PROPOSAL FOR RADON MAPPING

Ildikó Mócsy[1], István Csige[2], Kinga Szacsvai[1], Mária Ranogajec-Komor[3] and Tamás Néda[1]
[1]Sapientia Hungarian University of Transylvania, Cluj-Napoca, Romania
[2]Institute of Nuclear Research, Debrecen, Hungary
[3]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
mocsyil@gmail.com

INTRODUCTION

^{222}Rn (radon) gas is a member of the decay chain of ^{238}U (^{226}Ra) which can be found in soils. Radon poses a health risk mainly by the alpha radiation of its inhaled short live decay products. Since radon is responsible, in average, for more than half of the exposure of the public from natural sources, and much of exposures occur in buildings, therefore studies of indoor radon gained particular attention. Radon concentration and exposure to radon progeny in buildings is influenced by a number of parameters including geological settings, meteorological factors, building characteristics, occupant's behaviour and living standards.

Effective strategies of protection against radon may profit from the use of maps of indoor radon potential. Geological settings of the Carpathian Basin and similarities in building characteristics in this region call for the construction of a common radon map for this area [1]. The aim of our paper is to propose a method to characterise radon potential of building sites that is easy and commonly applicable for radon mapping in the area of the Carpathian Basin.

MATERIALS AND METHODS

Perhaps the most common method used to prepare a radon map is based on the measurements of indoor ^{222}Rn activity concentration in existing houses. In an area of 5 – 10 km^2 a sample of houses that represent the building stock on the area are selected. In the living and in the bedroom of these houses the average ^{222}Rn activity concentration is measured using etched track type radon detectors exposed for 3 to 6 months. If more than 1 % of samples have average ^{222}Rn activity concentration higher than the action level (between 200 – 600 Bq m^{-3} for houses) then the area is considered as radon affected [2-4].

The major source (accounting for about 60 % in average) of radon in the air of buildings and houses is the soil. Determining the radon flux density on the surface of soil at measurement point close to the buildings, the amount of radon that accumulates in the buildings can be estimated with an appropriate model and taking into account the characteristics of the buildings. Performing this procedure on building sites the results may be used to characterize the radon potential of the building site.

The ^{222}Rn activity concentration in the soil gas and the transport of radon in soils depends on many parameters including the uranium (radium) content of the soil which is a function of the mineralogical composition of rocks; and the porosity, water saturation, density, permeability and grain size distribution of the soil. The geological, structural properties (stratification, faulting) of a geographical area may determine the migration of radon in the soil towards the atmosphere.

In order to be available for transport in soils, radon atoms that are produced from the decay of ^{226}Ra need to be emitted into the pore space of the soil. The ratio of radon atoms that are emitted into the pore space to the total number of radon atoms that are produced in the soil is the emanation fraction. The emanation fraction may vary from a few % to up to 72 % in different geological formations. For soils it is usually between 20 and 50 %. ^{222}Rn activity concentration in pore volume is usually expressed in Bq m^{-3}. The typical ^{222}Rn activity concentration in soils is in the order of 10 kBq m^{-3} while in the atmosphere it is around 10 Bq m^{-3}.

Radon in the pore volume distributes between the air and the water filled pore fraction. The distribution coefficient between these two phases depends on the temperature. The transport between the two phases is relatively quick comparing to the overall transport velocities of radon in the bulk soil. Much of the radon transport in the soil occurs in the gas phase. The main transport processes are the advection and diffusion. Advection is forced by pressure gradient (apart from gravity induced gradient) and is usually the main transport mechanism which brings radon into indoor volumes of buildings. Diffusion is also important especially in free radon exhalation of soils into the atmosphere. Driving force for diffusion is concentration gradient in the soil pore volume.

The transport of radon in the porous medium is described by the ^{222}Rn activity flux density $\bar{j}(x,y,z)$, the unit of which is Bq m^{-2} s^{-1}. Although both diffusion and advection may occur in both water and gas phases the

overall transport can be described by a single diffusion constant and by a single volume flux density of a carrier medium.

The most important parameters that determine the radon potential of a building site and are easily measurable as well are the radon content of soil gas at a certain depth, the permeability of the soil and the radon flux density on the soil surface. All of these parameters may vary significantly depending mostly on water saturation of the soil, therefore this parameter needs also to be measured. In order to be able to compare radon potential of a building site to radon concentration in existing houses a simplified reference houses is defined and a computer model is developed to simulate the transport of radon into the reference house [5,6].

This model calculates the transport of heat, soil gas and radon in the unsaturated soil and in the building. Weather parameters characteristic for the site at different seasons are used in the calculations as time dependent boundary conditions. Measured data on the site serve both as input parameters (soil gas content, permeability, water saturation) and validation parameter (radon flux density on soil surface) in the first part of the model calculation. After validation the ^{222}Rn activity concentrations in the reference house for different seasons are calculated and then the annual average ^{222}Rn activity concentration is determined.

Variation of meteorological parameters influences the entry rate of radon into houses. The pressure difference between indoor and outdoor air depends on temperature difference, heating and ventilation rates. Barometric pumping and wind induced pressure depressions are also an effective factors pumping radon into indoor volumes. Saturation of soil with water blocks entry routes to the atmosphere around the building while under the building dry soils are still penetratable. Although water saturation increases the radon emanation fraction it decreases both diffusion coefficient and permeability of the soil resulting in smaller radon fluxes. Permanent freezing and thick snow cover also blocks free exhalation.

For the direct measurements of the radon flux density we have used the accumulation chamber method [7]. The volume of the accumulation chamber was 0.067 m^3, the area of the base was 0.08 m^2. For the measurement of ^{222}Rn activity concentration in the volume of the accumulation chamber we have used an AlphaGUARD type ionization chamber in diffusion mode. First the AlphaGUARD instrument was placed onto the soil standing on small legs, and then the accumulation chamber was placed over it. The perimeter of the accumulation chamber was pressed into the soil at a depth of 5 cm. This is a crucial moment in this method. For many soils it is not possible to do this

without deepening a slot hollow in the soil before placing the accumulation chamber on it. Accumulation time was about 10 hours. ^{222}Rn activity flux density was determined by the following formula:

$$j = \frac{C_{\max} \cdot \lambda_{ef} \cdot V}{S} \qquad (1)$$

In order to obtain a more accurate measurement result relatively long accumulation time is necessary. However, in this case in the mathematical model which describes the measurements we need to account for the back diffusion, that is, for the increasing ^{222}Rn activity concentration in the volume of the accumulation chamber. We have taken this effect into account [8]. Still, after 5 – 6 hours the ventilation rate of the accumulation chamber seemed to vary significantly causing deviation of the theoretical build-up curve of ^{222}Rn activity concentration in the accumulation chamber, therefore we have limited the accumulation time for the first 5 – 6 hours in estimating the radon flux density from the measured ^{222}Rn activity concentration time series.

We have measured the ^{222}Rn activity concentration in houses in Cluj. The houses were built between 1925 and 1990. ^{222}Rn activity concentration was measured on the ground floor of the buildings at 1 meter high from the floor using etched track type radon detectors. We have also measured the ^{222}Rn activity concentration in soil gas taken from the vicinity of these houses. Soil gas samples were taken from 70 – 80 cm below the surface and ^{222}Rn activity concentrations were measured with the AlphaGUARD instrument. Correction factor to obtain saturation value was applied. Saturation value does not depend on the flow rate of soil gas; however the measurable ^{222}Rn activity concentration at shallow depth does depend on it. In absence of advection the saturation value is about 1.5-fold higher than the measurable ^{222}Rn activity concentration at 0.8 m.

RESULTS

The measured radon activity flux density (also known as radon exhalation rate) varied between 1.0 – 17.2 mBq m^{-2} s^{-1} at 24 measuring points. The measured values of ^{222}Rn activity concentration in soil gas samples and of indoor air are presented in Table 1. From these measurements we can conclude that the ratio between soil gas radon content and indoor ^{222}Rn activity concentration is relatively low comparing to literature data.

Table 1. ^{222}Rn activity concentration in soil and in indoor air

Location	^{222}Rn activity concentration (Bq m^3)		C_s / C_i
	C_s in soil	C_i indoor	
1	1604 ± 16	308 ± 13	5.2
2	1432 ± 42	109 ± 5	13.1
3	1182 ± 28	91 ± 7	12.9
4	1476 ± 12	146 ± 4	10.1
5	1424 ± 16	110 ± 24	12.9
6	1118 ± 39	210 ± 15	5.3
7	2276 ± 14	209 ± 17	10.9
8	2130 ± 14	120 ± 4	17.8
9	1308 ± 25	159 ± 5	8.2
10	2042 ± 28	119 ± 10	17.2
11	1648 ± 18	447 ± 15	3.7
12	1352 ± 19	106 ± 5	12.8
13	2302 ± 21	181 ± 8	12.7
14	2240 ± 23	257 ± 6	8.7
15	2166 ± 63	91 ± 5	23.8
16	2970 ± 25	216 ± 12	13.8
17	2908 ± 24	215 ± 13	13.5
			Average: 11.9 ± 5.0

Nevertheless, on the bases of the measured ^{222}Rn activity concentrations (between 91 – 447 Bq m^3) in the buildings the radon potential of the investigated area can be considered as a medium radon risk area.

CONCLUSIONS

The effective protection of the public against radon requires that the buildings should be safe from the point of view of the radon gas. Radon maps serve as valuable tools in designing effective strategies in the program of protection against indoor radon both for existing and future houses. Optimization of allocation of resources can be done more effectively in the knowledge of area distribution of radon prone areas. Data of indoor radon concentration measurements in existing houses can be combined with estimates of radon concentration in a reference house obtained by model calculation based on the experimental measured data on building sites of

future houses. Thus more accurate radon maps can be obtained for areas where indoor radon data are not available from existing houses.

On the other hand experimental results show that radon content of soil gas, radon exhalation of soil surfaces may vary significantly even in a small area. Therefore sufficiently large number of sampling points should be investigated to obtain representative result for a given geological area. Because of this variability testing of individual building sites in a radon prone area may also be advisable to identify sites with high radon risk, in which case additional measures against soil radon should be applied in construction technology.

Acknowledgment

This study was supported partly by Hungarian Academy of Sciences; the project number was 2008/B/20/cs.

REFERENCES

[1] Mócsy I, Néda T, Bányász Gy, Hening K, Krézsek Cs, Köteles Gy, Toró L. Radon a Kárpát-medencében, Ábel, Cluj-Napoca, 2008. ISBN 978-973-114-080-3.

[2] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection against radon-222 at home and at work. Annals of the ICRP-65, Pergamon Press, 1993.

[3] International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: IAEA; 1996.

[4] Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data. Health Physics, 1996;74(3):370-377.

[5] Csige I, Vásárhelyi A, Hakl J, Hunyadi I. Radon transport studies in soil at a "test-house" located in a radon-prone area. 1997. http://www.sorostm.ro/radioecology/

[6] Vásárhelyi A, Csige I, Hakl J, Hunyadi I. Spatial distribution of radon content of soil-gas and well-waters measured with etched track radon monitors. Radiat Measur 1997;28(1-6):685-690.

[7] Zhukovskí M, Shorikov A, Rogatko A. Accumulator chamber method modification for the radon flux measurements. Radon in the Living Environment. 19-23 April, 1999; Athens, Greece; 1999.

[8] Csige I.A ^{222}Rn aktivitásáram-sűrűségének mérése talajfelszínen gyűjtőedényes módszerrel. Sugárvédelem 2009;2:39-43.

RADON U ŠPILJAMA HRVATSKE – DOZE KOJE PRIME ZAPOSLENICI I POSJETITELJI

Vanja Radolić[1], Igor Miklavčić[1], Marina Poje[1], Denis Stanić[1], Branko Vuković i Dalibor Paar[2]
[1]Sveučilište u Osijeku, Osijek
[2]Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
vanja@fizika.unios.hr

UVOD

Špilje su u krškom području većinom izgrađene od vapnenca. Budući da vapnenac sadrži u prosjeku 1,3 – 2,5 ppm uranija ^{238}U [1], a radon je jedan od uranijevih potomaka, za očekivati je da postoje krške špilje s povećanom koncentracijom radona. Općenito, koncentracija radona u špiljama ovisi o različitim parametrima, a dominantni su: ekshalacija radona s površina u špilji, oblik i veličina špilje, dotok zraka izvana i njegovo miješanje sa zrakom unutar špilje. Tako je temperaturna razlika između vanjskog zraka i zraka unutar špilje vodeći mehanizam izmjene zraka u horizontalnim špiljama, dok kod vertikalnih špilja tu ulogu ima razlika tlakova između gornjeg i donjeg dijela špilje [2]. Prema tome, kod horizontalnih špilja su, zbog temperaturnog gradijenta i efekta dimnjaka, koncentracije radona uglavnom najveće ljeti. Zbog smanjene prirodne cirkulacije zraka u špiljama, moguće su visoke koncentracije radona u nekima od njih. Hakl i suradnici [1] su sistematizirali izmjerene radonske koncentracije u špiljama diljem svijeta te su zaključili da im je distribucija približno log-normalna, s aritmetičkom sredinom 2,8 kBq m^{-3}, a vrijednosti su bile u rasponu od 0,1 do 20 kBq m^{-3}. Sličan rezultat od 2,5 kBq m^{-3} dobio je i Cigna [3] analizirajući novopublicirane radonske koncentracije. Tu su potencijalnu opasnost prepoznale međunarodne agencije: Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICRP) i Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) koje su dale preporuku te sigurnosni standard za radon i njegove potomke prema kojima godišnja efektivna doza za posjetitelje ne treba prelaziti 3 mSv, a za zaposlenike (radnike na održavanju, turističke vodiče) 20 mSv (usrednjeno u petogodišnjem razdoblju). Unatoč ovim preporukama mnogi radnici u špiljama zbog visoke koncentracije radona primaju dozu koja premašuje navedene preporučene vrijednosti [4-6]. Stoga je jedan od najprihvatljivijih načina za smanjenje primljene doze

ograničavanje broja radnih sati unutar špilje, što se nadzire kontinuiranim monitoringom kako špilje tako i zaposlenika [7]. Za određivanje efektivne doze primljene od radona i njegovih kratkoživućih potomaka korišten je epidemiološki model opisan u ICRP-65 publikaciji [8], koja daje konverzijske faktore između efektivne doze i ekspozicije (efektivna doza od 1,1 mSv za opću populaciju, odnosno 1,425 mSv za zaposlenike ekvivalentna je izloženosti radonovim potomcima od 1 mJ h m^{-3}). Pritom omjer između izloženosti radonovim potomcima i ekvivalentne ravnotežne koncentracije radona iznosi $5{,}56 \times 10^{-6}$ mJ h m^{-3}. Time se, uz poznavanje ravnotežnog faktora (omjer ekvivalentne ravnotežne koncentracije radona i stvarne koncentracije radona), dolazi do relacije koja povezuje izračunatu efektivnu dozu E s izmjerenom radonskom koncentracijom c, određenim ravnotežnim faktorom F i vremenom ekspozicije t:

$$E[mSv] = 7{,}923 \cdot 10^{-6} \cdot F \cdot c\left[Bq\,m^{-3}\right] \cdot t[h]. \qquad (1)$$

MATERIJALI I METODE

Mjerenje koncentracije radona u zraku u špilji vrši se pasivnom metodom s detektorima nuklearnih tragova LR-115 tip II. Cilindrični plastični nosač detektora (posuda promjera 11 cm i visine 7 cm), prekriven je na vrhu filtar papirom površinske gustoće 0,078 kg/m^2. Unutar nosača, na njegovom dnu, nalazi se jedan film LR-115 tip II, veličine 2×3 cm^2, koji služi kao difuzni detektor. Drugi je film pričvršćen na vanjsku stijenku plastičnog nosača i služi kao otvoreni detektor. Pritom, difuzni detektor bilježi samo tragove alfa čestica emitirane od radona, jer radonovi potomci ne mogu proći kroz filtar papir. Otvoreni detektor bilježi ukupan broj alfa čestica koje potječu i od radona i od njegovih kratkoživućih potomaka. Ova metoda mjerenja dvama detektorima nuklearnih tragova omogućuje određivanje ravnotežnog faktora F između radona i njegovih kratkoživućih potomaka u zraku te bolju procjenu primljene radonske doze korištenjem jednadžbe (1) [9].

Kontinuirano mjerenje koncentracije radona i njegovih kratkoživućih potomaka u zraku kao i mjerenje određenih meteoroloških parametara (temperature zraka, barometarskog tlaka, relativne vlažnosti zraka) izvodi se AlphaGUARD mjernim sustavom, a s ciljem praćenja dnevne varijacije radona i njegovih kratkoživućih potomaka. Određivanje ekvivalentne ravnotežne koncentracije radonovih potomaka kao i tzv. ravnotežnog faktora određuje se pomoću Radon WL Meter TN-WL-02 koji se spaja na AlphaGUARD mjerni sustav.

U Republici Hrvatskoj, radon u jamama i špiljama se sustavnije mjeri od 2004. godine. Detektori se postavljaju tijekom speleoloških istraživanja kojima se istražuju fizikalna i kemijska svojstva krškog podzemlja. Dosad su izmjerene vrijednosti radona u 20-tak špilja Velebita i Žumberačkog gorja. Pored toga, napravljen je i monitoring radona u Đurovića špilji koja se nalazi u blizini kontrolnog tornja zračne luke Dubrovnik što je čini interesantnom za turistički obilazak. Detektori nuklearnih tragova su izlagani u kasnu jesen 2008. te proljeće i ljeto 2009. godine na 14 mjernih lokacija unutar špilje. U lipnju 2010. započet je petnaestomjesečni monitoring radona i njegovih kratkoživućih potomaka u špilji Manita peć – jedinoj špilji unutar Nacionalnog parka Paklenica koja se koristi za turističku namjenu, a s ciljem procjene doze koju primaju kako posjetitelji tako i turistički vodiči.

REZULTATI

Mjerenja radona provedena speleološkim istraživanjima dubokih jamama na Velebitu su pokazala da je najviša koncentracija radona izmjerena u Lubuškoj jami (3,8 kBq m^{-3}) na 260 metara dubine [10] dok je na Žumberačkom gorju najviša vrijednost izmjerena u špilji Dolača u ljetnom periodu (21,8 kBq m^{-3}), 250 metara od ulaza u špilju [11].

Monitoringom radona u Đurovića špilji u tri klimatološka razdoblja dobivene su sljedeće srednje koncentracije radona u špilji: 9,5 (kasna jesen), 17,9 (proljeće) i 25,0 kBq m^{-3} (ljeto) (Slika 1). Srednja godišnja radonska koncentracija od 17,6 kBq m^{-3} svrstava Đurovića špilju među krške špilje s visokom koncentracijom radona (i do 10 puta veća koncentracija ljeti od srednje koncentracije radona u špiljama u svijetu). S obzirom na preporučenu maksimalnu godišnju dozu od 20 mSv za radna mjesta i srednju brzinu doze u špilji od 44 μSv/h, zaposlenici koji dio radnog vremena provode u njoj (turistički vodiči) trebaju ograničiti svoj boravak unutar špilje na 454 sata godišnje. Maksimalna efektivna doza od radona i njegovih kratkoživućih potomaka koju prima posjetitelj Đurovića špilje tijekom ljeta, za vrijeme polusatnog obilaska, iznosi 30,6 μSv.

Preliminarni rezultati monitoringa radona na 17 mjernih lokacija u špilji Manita peć pokazuju da ona pripada krškim špiljama s ispodprosječnom koncentracijom radona jer je srednja koncentracija radona u ljetnom razdoblju iznosila 1,1 kBq m^{-3}. Pritom je koncentracija radona uniformno distribuirana unutar špilje (Slika 2). Kontinuirano mjerenje radona i njegovih kratkoživućih potomaka AlphaGUARD mjernim sustavom nije pokazalo njihove dnevne varijacije koje bi bile posljedica

ljudske aktivnosti za vrijeme ili nakon turističkih obilazaka. Izloženost srednjoj ljetnoj brzini doze od 3,7 μSv/h u špilji za turističke vodiče znači da su u klimatološkom ljetu na radnom mjestu primili dozu od 0,42 mSv. Prosječna efektivna doza od radona i kratkoživućih potomaka koju prima posjetitelj za vrijeme polusatnog obilaska špilje u ljetnom razdoblju iznosi 1,86 μSv.

Slika 1. Sezonske varijacije koncentracije radona (c_{Rn} / kBq m^{-3}) na mjernim lokacijama (M1 – M14) u Đurovića špilji.

Slika 2. Prostorna razdioba radona u špilji Manita peć za ljetno klimatološko razdoblje u 2010.

Zahvala

Autori zahvaljuju Upravi Nacionalnog parka Paklenica, a posebno gđi. Nataliji Andačić, stručnom suradniku – geografu, kao i Upravi zračne luke Dubrovnik te posebno g. Tomislavu Macanu, direktoru tehnike i inženjeringa, na punoj suradnji prilikom izlaganja detektora.

LITERATURA

[1] Hakl J, Hunyadi I, Csige I, Géczy G, Lénárt L, Várhegyi, A. Radon transport phenomena studied in karst caves – International experiences on radon level and exposures. Radiation Measurements 1997;28:675-684.

[2] Hakl J, Csige I, Hunyadi I, Várhegyi A, Géczy G. Radon transport in fractured porous media - experimental study in caves. Environ Int 1996;22 (Suppl. 1):S433-S437.

[3] Cigna AA. Radon in caves. International J Speleol 2005;34:1-18.

[4] Papastefanou C, Manolopoulou M, Savvides E, Charalambous S. Natural radiation dose in Petralona Cave. Health Physics 1986;50:281-286.

[5] Pinza-Molina C, Alcaide JM, Rodriguez-Bethencourt R, Hernandez-Armas J. Radon exposure in the caves of Tenerife (Canary Islands). Radiat Protect Dosim 1999;82:219-224.

[6] Jovanovič P. Radon measurements in karst caves in Slovenia. Environment International 1996;22 (Suppl.1):S429-S432.

[7] Vaupotič J, Csige I, Radolić V, Hunyadi I, Planinić J, Kobal I. Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna cave, Slovenia. Health Phys 2001;80:142-147.

[8] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection against Radon-222 at Home and at Work. Pergamon Press, ICRP Publication 65. 1994.

[9] Planinić J, Radolić V, Faj Z, Šuveljak B. Radon equilibrium factor and aerosols, Nucl Instrum Method Phys Reas A, 1997;396:414-417.

[10] Paar D, Ujević M, Bakšić D, Lacković D, Čop A, Radolić V. Physical and Chemical Research in Velebita pit (Croatia). Acta Carsolog 2008;37(2-3):273-278.

[11] Paar D, Radolić V, Lacković D, Buzjak N, Čop A, Bakšić D. Radon concentration measurements on Mt. Velebit and Mt. Žumberak (Croatia). U: Gabrovšek F, Mihevc A, ur. The Book of Abstracts of the 17th International Karstological School "Classical Karst", 15.-19. lipnja 2009; Postojna, Slovenija. IZRK ZRC SAZU; 2009. str. 78.

RADON CONCENTRATION IN CAVES OF CROATIA – ASSESING EFFECTIVE RADON DOSES FOR OCCUPATIONAL WORKERS AND VISITORS

Vanja Radolić[1], Igor Miklavčić[1], Marina Poje[1], Denis Stanić[1], Branko Vuković and Dalibor Paar[2]
[1]University of Osijek, Osijek, Croatia
[2]University of Zagreb, Zagreb, Croatia
vanja@fizika.unios.hr

Radon monitoring at potentially highly radioactive location such as caves is important to assess the radiological hazards to occupational workers and occasional visitors. In its Publication 65 the ICRP has produced recommendations dealing with exposure to elevated background radiation, in particular, the risk associated with the inhalation of radon and radon progeny. Recommended annual effective dose from radon ^{222}Rn and its short-lived progeny for workers should not exceed 20 mSv and for occasional users (visitors) the same recommendation is 1 mSv. Measurements were performed with series of track etched detectors (LR115 – type II) in several caves in Croatia. The obtained values for the radon concentration ranged from ambient values up to several thousand Bq m^{-3}.

Radon concentration was measured in about 20 caves of Velebit and Žumberak mountains and the highest radon concentration was in Lubuška jama (3.8 kBq m^{-3}) and cave Dolača (21.8 kBq m^{-3}), respectively.

Đurovića cave is especially interested because of its huge tourist potential due to its location bellow Dubrovnik airport. Its mean annual radon concentration of 17.6 kBq m^{-3} classifies Đurovića cave among caves with high radon concentration. A visitor during half an hour visit at summer time would receive an effective dose of 30.6 μSv. Calculated mean dose rate of 44 μSv/h means that workers (mainly tourist guides) should limit their time inside cave to 454 hours per year.Manita peć is the only cave open for tourists on the territory of Paklenica National Park. The preliminary radon measurements performed during summer 2010, gave an average radon concentration of 1.1 kBq m^{-3}. An exposure to average dose rate of 3.7 μSv/h means that the tourist guides would receive an effective dose of 0.42 mSv during summer period according to their working schedule. A visitor during half an hour visits would receive an effective dose of 1.86 μSv.

DIURNAL VARIATION OF RADON CONCENTRATION IN THE POSTOJNA CAVE

Asta Gregorič and Janja Vaupotič
Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia
asta.gregoric@ijs.si

INTRODUCTION

Postojna Cave (Figure 1a), with 20 km of galleries, is the longest known cave system and also the largest of about 20 show caves in Slovenia and one of the most visited show caves in the world. It is well known that high concentrations of radon are common in karstic caves [1-3], although quantities of uranium (^{238}U) in limestone are rather low. The reason for this is low natural ventilation of the underground cavities. Tectonic faults constitute an additional source of radon. Variations of radon concentration in cave air arise from a balance of the emission from cave surfaces and drip waters, decay in cave air, and exchange with the outside atmosphere [4]. Because of its elevated radon concentrations, Postojna Cave has been under permanent radon survey since 1995 [5-6]. The influence of meteorological conditions on the radon levels and their temporal variations depends mostly on the shape of the cave [7], and the number and directions of cracks, corridors and fissures connecting the cave rooms with the outside atmosphere. The driving force for air movement in horizontal caves, and thus the inflow of fresh air and release of the cave air to the atmosphere, is the temperature difference between the cave air and outdoors, which causes seasonal pattern of radon concentration in the cave with high levels in summer and low in winter. However, on a daily scale different behaviour of radon can be observed at different locations in the cave. In this paper diurnal variation of radon concentration at two locations is presented and discussed.

SITE DESCRIPTION AND MEASUREMENTS

Postojna Cave is a horizontal cave with a stable yearly temperature around 10 °C. Continuous measurements of radon concentration were carried out from 2005 to 2010 at two locations along the guided tourist trail. The first measurement site (P1) is located in the Great Mountain hall, the biggest collapse chamber in Postojna Cave (Figure 1b), whereas the second (P2), in a narrow natural passage Beautiful Caves (Figure 1b), characterized

by numerous cracks in the faulted rocks. Both measurement sites lie about 2 km from the tourist entrance.

Figure 1. a) Slovenia with the Postojna Cave indicated. b) The passages of Postojna Cave with indicated monitoring sites P1 (Great Mountain hall) and P2 (Beautiful Caves) [8].

Radon concentration was measured with Radim 5 WP monitors (SMM Company, Prague, Czech Republic) with sampling frequency once an hour. The Radim 5 monitor determines radon concentration by measuring gross alpha activity of the decay products ^{218}Po and ^{214}Po, collected electrostatically on a semiconductor detector. The lower limit of detection is about 50 Bq m^{-3}. Data are stored in the inner memory of the instrument and then transferred to a personal computer for further evaluation.

Hourly values of outside air temperature and barometric pressure at the Postojna meteorological station were obtained from the Office of Meteorology of the Environmental Agency of the Republic of Slovenia.

RESULTS

In general, radon concentration was the lowest in winter, with average values of 2500 and 7000 Bq m^{-3} at P1 and P2, respectively. Radon concentration was lower and more stable at P1, whereas greater variations were noticed at P2, especially in spring and autumn. In this transition period between summer and winter, radon concentration can vary by more than 2 kBq m^{-3} per day. Furthermore, under special atmospheric conditions significant diurnal variations of radon concentration were observed at P2. In summer the ventilation of the cave is reduced, causing higher radon levels in the cave. However, when outside air temperatures are high enough (over 25 °C), slight draught of air in the opposite direction than in winter takes place. This effect was noticed in summer 2007 (Figure 2). Ventilation of the cave was reduced because of low night outside air temperatures (around 10 °C, i. e., similar to that in the cave), thus allowing radon concentration to build up, whereas temperatures from 30 to 35 °C during day time triggered slight draught of air out of the cave, allowing fresh air to enter the cave through cracks and small breathing holes from above, thus reducing radon concentration. Radon concentration was decreasing gradually from 14th to 20th July at both measurement sites due to very high outside air temperatures.

Figure 2. Radon concentration (C_{Rn}) at measurement sites P1 and P2, outside air temperature (T) and barometric pressure (P) in summer 2007

Although not so significant as in summer, diurnal variation of radon concentration at site P2 can be noticed also in spring. In spring 2008 (Figure 3), outside air temperatures varied between 2 and 18 °C on a daily scale. Inflow of cold fresh outside air at nights diluted radon-reach cave air, whereas decreasing ventilation during the day time, when outside air temperature slightly exceeded the cave temperature, caused radon concentration to increase. In spring, general trend of radon concentration at P1 is comparable to that at P2, but with a time delay of app. one day.

Diurnal variations of radon concentration are less pronounced in winter, when intense ventilation, driven by low outside air temperature, does not allow radon to accumulate. Decreasing barometric pressure during cold fronts in winter has an additional effect on radon concentration. In this case the cave system may become over-pressurized with respect to the outside atmosphere and therefore releasing the radon-rich cave air into the atmosphere and thus enhancing the entry of fresh air into the cave.

Figure 3. Radon concentration (C_{Rn}) at measurement sites P1 and P2, outside air temperature (T) and barometric pressure (P) in spring 2008

The absence of diurnal variation of radon concentration at Great Mountain hall reflects a strong smoothing effect caused by diffusion in large air volume at this point. On the other hand, relatively small and narrow passage of Beautiful Caves, together with highly developed fracture system inside the fault zone, are possible reasons for occasional strong diurnal variations of radon concentration.

CONCLUSION

The evaluation of five-year radon monitoring at two sites in the Postojna Cave reveals significant diurnal and seasonal variations of radon concentration. Diurnal variations are noticed only under special atmospheric conditions and depend mostly on the outside air temperature variation. On average, radon concentrations were in the ranges of 500 – 2500 Bq m^{-3} and 500 – 7000 Bq m^{-3} at site P1 and P2, respectively. On a long-time scale similar effect of atmospheric conditions is often observed at both sites. However, local morphology and characteristics of the cave at the site cause different short-time variations of radon concentration. Thus, radon concentrations are lower and more stable at the Great Mountain hall, whereas they are higher and with more pronounced diurnal and seasonal variations in the Beautiful Caves.

Acknowledgment

This study was financed by the Slovenian Research Agency under the contract number J1–0745. The cooperation of the Postojna Cave management and personnel is appreciated. The authors thank the Environment Agency of the Republic of Slovenia for providing the atmospheric data.

REFERENCES

[1] Cigna A A. Radon in caves. Int J Speleol 2005;34:1-18.

[2] Hakl J, Hunyadi I, Csige I, Géczy G, Lénárt L, Várhegyi A. Radon transport phenomena studied in Karst caves - international experiences on radon levels and exposures. Radiat Meas 1997;28:675-684.

[3] Gillmore G K, Phillips P S, Denman A R, Gilbertson D D. Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves. J Environ Radioact 2002;62:165-179.

[4] Wilkening M H, Watkins D E. Air exchange and Rn-222 concentrations in Carlsbad Caverns. Health Phys 1976;31:139-145.

[5] Vaupotič J, Csige I, Radolić V, Hunyadi I, Planinić J, Kobal I. Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna Cave, Slovenia. Health Phys 2001;80:142-147.

[6] Vaupotič J. Nanosize radon short-lived decay products in the air of the Postojna Cave. Sci Total Environ 2008;393:27-38.

[7] Hakl J, Csige I, Hunyadi I, Várhegyi A, Géczy G. Radon transport in fractured porous media - Experimental study in caves. Environ Int 1996;22:433-437.

[8] Šebela S, Vaupotič J, Košťák B, Stemberk J. Direct measurement of present-day tectonic movement and associated radon flux in Postojna cave, Slovenia. J Cave Karst Stud 2010;72:21-34.ť

THE INFLUENCE OF AIR TEMPERATURE AND BAROMETRIC PRESSURE ON RADON AND CARBON DIOXIDE LEVELS IN AIR OF A KARST CAVE

Kristina Obu[1], Asta Gregorič[2], Mateja Smerajec[2], Barbara Čenčur Curk[1], Ryoko Fujiyoshi[3], Yosuke Sakuta[3] and Janja Vaupotič[2]
[1]University of Nova Gorica, Nova Gorica, Slovenia
Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia
[3]Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo, Japan
janja.vaupotic@ijs.si

INTRODUCTION

Radioactive noble gas radon (^{222}Rn) is created in minerals by radioactive transformation of ^{226}Ra within the ^{238}U natural decay chain. It migrates through the ground, accumulates in underground rooms (e. g., karst caves) and eventually enters the atmosphere [1]. It is always present in our living and working environment. Because of its harmful health effect, it presents a serious social concern but is, on the other hand, a useful tool in several scientific disciplines. It is thus used as a tracer in exploring movement of air masses and an indicator of tectonic faults. Another minor constituent of air is carbon dioxide. Similar as radon, it is dangerous at high levels, but its presence in air of karst caves is indispensable for their life, because it governs speleogenetic processes [2]. In the cave air, its concentration is determined by the inflow of outside air, biogenic activity of soil, degradation of organic matter and carbonate, degassing from water, and human activity. Therefore, ventilation of the cave is crucial for its conservation. Based on temporal variations of radon and carbon dioxide levels, ventilation regime in the cave can be estimated [3].

Radon has been surveyed in all the twenty show caves and in thirty other caves in Slovenia, with emphasis on the Postojna Cave [4]. In the present study, in addition to radon, monitoring of carbon dioxide was introduced for the first time. The Kostanjevica Cave was selected because it is crossed by a tectonic fault at which measurements of three-dimensional micro displacements are underway. Because of the fault, high levels of radon and carbon dioxide were expected [5]. In this paper, measurements are described and both the spatial and time variations of radon and carbon dioxide levels are presented and commented on.

MATERIAL AND METHODS

The Kostanjevica Cave (Kostanjeviška jama) is situated in southern Slovenia (Figure 1) in an isolated island of karst. It is crossed by a tectonic fault. Under the cave, there are several water springs and a source of a creek. The cave is composed of the main and several parallel corridors and passages, some mutually connected and some ending into closed pockets. The total length of about 2 km is well known but other parts are still under exploration. The part open for visits is dry while several other corridors are flooded. Air temperature in the cave is practically constant 11 – 15 ºC all the year round.

Figure 1. Ground plan of the Kostanjevica Cave [6] with measurement points K1 − K3 for continuous and T1 − T9 for instantaneous measurements

At points K1, K2 and K3, continuous radon monitoring was carried out with the RadonScout devices (Sarad, Germany) from April to December 2009, with several interruptions because of the instrument failures. The instrument gives hourly values of radon concentration, as well as air temperature and relative humidity. Data are saved in the internal memory and periodically transferred to a personal computer for data evaluation.

At points T1 to T9 along the guided tourist route, instantaneous concentrations of radon and carbon dioxide were measured monthly from August 2009 to March 2010. For the former, air was sampled into 0.7 dm^3 alpha scintillation cells manufactured at the Jožef Stefan Institute [7] and measured in a PRM 145 α-counter (AMES, Slovenia), and for the latter, a Testo 435 device connected to an IAQ non-dispersive infrared probe (Testo, USA) was used. Outdoor air temperature and barometric pressure for the nearby meteorological station were obtained from the Office of Meteorology of the Environmental Agency of the Republic of Slovenia.

RESULTS

Figure 2 shows results of continuous measurements at K1. As expected for horizontal caves [4], radon concentration (Figure 2a) is significantly higher in summer ($1800 - 2200$ Bq m^{-3}) than in winter ($20 - 500$ Bq m^{-3}). In winter the cave temperature is higher than outside (Figure 2b) and cave air is released from the cave into the outdoor atmosphere due to the air draught caused by the "chimney effect", thus allowing fresh and cold outdoor air with low radon concentration to enter the cave through low lying openings. This effect is not operative in summer, when the outside temperature is higher than in the cave, and air draught is minimal or reversed. On a daily basis radon concentration appeared not to be dependent on the outside air temperature. Barometric pressure appears not to influence radon levels, either in summer or in winter. Neither the influence of the fault has been noticed.

A similar situation was found at K3. On the other hand, it was substantially different at K2: last week of November, with outside air temperature changing from 2 to 18 ºC, radon concentration fluctuated from 500 to 6000 Bq m^{-3}, until the temperature drastically did fall and radon concentration decreased and remained constantly low at about 10 Bq m^{-3} (Figure 3). Point K2 is in the middle of the main corridor which continues to larger galleries and halls. Therefore, the air flow may differ markedly from that at K1 and K3 points, being off the main corridor.

Figure 2. a) Radon concentration (C_{Rn}) and *b)* outdoor temperature (T_{out}) and barometric pressure (P) obtained with continuous measurements at K1

Figure 3. Radon concentration (C_{Rn}) and outdoor temperature (T_{out}) obtained with continuous measurements at K2

Instantaneous concentrations of radon and carbon dioxide are shown in Figure 4. While in summer (with low ventilation and stagnant air), spatial distribution along the main cave corridor is quite uniform, this is not the case in other seasons (with enhanced ventilation due to natural air draught).

Figure 4. Instantaneous radon (C_{Rn}) and carbon dioxide (C_{CO_2}, in volume ppm) concentrations at T1 − T9 at dates indicated

The patterns of spatial distribution of radon and carbon dioxide in November, January and March were similar. Except for radon in summer, they are considerably higher than outside (cca 10 Bq m^{-3} and cca 300 ppm, respectively) and, except at T9, were growing with distance from the entrance, as expected [2-3]. Contributions of carbon dioxide have not been identified. A very high correlation (R = 0.86) between levels of both gases was observed. Obviously, also carbon dioxide levels, as evidenced for radon, are mostly controlled by the ventilation regime, and not affected by visitors.

CONCLUSION

Change of ventilation regime in the cave is reflected in seasonal variation of radon concentration. It is high in summer (1800 − 2200 Bq m^{-3}) and substantially reduced in winter (20 − 500 Bq m^{-3}), when temperature in the cave is higher than outside and radon is diluted by the inflow of outside air, caused by natural air draught. This draught is minimal or reversed in summer. Concentrations of both gases, radon and CO_2, are well correlated.

Acknowledgment

The study was financed by the Slovenian Research Agency within the project contract no. J1–0745. The authors thank Mr. Brane Čuk, a tourist guide, for his assistance and technical support.

REFERENCES

[1] Nero Jr A V. Radon and its decay products in indoor air: an overview. In: Nazaroff W W and Nero Jr A V eds. Radon and its Decay Products in Indoor Air; New York: John Wiley & Sons; 1988. p. 1-53.

[2] Liñán C, Vadillo I, Carrasco F. Carbon dioxide concentration in air within the nerja Cave (Malaga, Andalusia, Spain). Int J Speleol 2008;37:99-106.

[3] Perrier F, Richon P. Spatiotemporal variation of radon and carbon dioxide concentrations in an underground quarry: coupled processes of natural ventilation, barometric pumping and internal mixing. J Environ Radioactiv 2010;101:279-296.

[4] Vaupotič J. Radon levels in karst caves in Slovenia. Acta Carsol 2010;39:503-512.

[5] King C Y, King B S, Evans W C, Zhang W. Spatial radon anomalies on active faults in California. Appl Geochem 1996;11:497-510.

[6] Gams I. Kras v Sloveniji v prostoru in času (Karst in Slovenia in space and time). 2nd ed., Ljubljana: Scientific Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts; 2004. p.p. 515.

[7] Vaupotič J, Ančik M, Škofijanec M, Kobal I. Alpha scintillation cell for direct measurement of indoor radon. J Environ Sci Heal A 1992;27:1535-1540.

ZAŠTITA OD ZRAČENJA U MEDICINI

RADIATION PROTECTION IN MEDICINE

ANALIZA OSOBNIH DOZA OSOBLJA U NUKLEARNOJ MEDICINI U DESETOGODIŠNJEM RAZDOBLJU

Mirjana Poropat[1,2], Damir Dodig[1,2], Martina Ciglar[1] i Stanko Težak[1]
[1]Klinički zavod za nuklearnu medicinu i zaštitu do zračenja,
KBC Zagreb, Zagreb
[2]Medicinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb
mporopat@kbc-zagreb.hr

UVOD

Cilj rada bio je analizirati vrijednosti osobne dozimetrije osoblja u nuklearnoj medicini i njihovu profesionalnu izloženost ionizirajućem zračenju u desetogodišnjem periodu nakon stupanja na snagu Zakona o zaštiti od ionizirajućeg zračenja [1]. Prema tom Zakonu postavljene su neke nove zakonske odredbe i uspostavljen novi centralni kompjutorizirani sustav praćenja svih osoba profesionalno izloženih ionizirajućem zračenju u našoj zemlji.

Očitane vrijednosti na dozimetrima pojedinih zaposlenika podijelili smo i analizirali u odnosu na radno mjesto u nuklearnoj medicini, te prirodu svakodnevnih radnih zadataka i obaveza.

MATERIJALI I METODE RADA

Svi zaposlenici u nuklearno medicinskim odjelima nose osobne dozimetre zbog registriranja izloženosti ionizirajućem zračenju pri radu s otvorenim izvorima zračenja i kontakta s bolesnicima kojima je apliciran radioaktivni izotop ili radiofarmak, zbog dijagnostičkog ili terapijskog postupka.

U analizu smo uključili 80 djelatnika Kliničkog zavoda za nuklearnu medicinu i zaštitu od zračenja, KBC Zagreb koji su tijekom promatranog razdoblja od 10 godina radili u Zavodu.

Desetogodišnji period podijelili smo u dva petogodišnja razdoblja od 2000. – 2004. godine i drugo od 2005. – 2009. godine i usporedili smo doze u navedenim petogodišnjim razdobljima. U petogodišnjem razdoblju ukupna doza izloženosti ionizirajućem zračenju prema Zakonu ne smije prijeći dozu od 100 mSv, a za jednu godinu ne smije prelaziti vrijednost od 20 mSv [1].

Prvih pet godina osoblje je nosilo dozvoljene film dozimetre, a u drugom petogodišnjem razdoblju zadnju godinu kontrole, film dozimetri su od ovlaštene ustanove za kontrolu dozimetara zamijenjeni termoluminiscentnim dozimetrima.

Djelatnike smo podijelili u 8 skupina prema radnom mjestu i svakodnevnim radnim zadacima koje obavljaju. Tehnološki rad pojedinih skupina je različit. Tih 8 skupina čine: 1. specijalisti nuklearne medicine, 2. djelatnici odjela za fiziku, 3. djelatnici odjela za scintigrafiju, 4. djelatnici odjela za radiofarmake i radioimunologiju, 5. djelatnici kliničkog odjela, 6. djelatnici na ultrazvuku, 7. spremačice i 8. administrativno osoblje.

Sve očitane doze dozimetara djelatnika pojedinih odjela iskazali smo kao prosječnu petogodišnju dozu za djelatnike tog odjela i stavili u odnos ta dva petogodišnja očitanja.

Ad 1. specijalisti nuklearne medicine u stalnom su kontaktu s bolesnicima koji su na dijagnostičkom ili terapijskom postupku i u radu koriste najčešće sljedeće radioizotope ^{99m}Tc, ^{131}I, ^{123}I, ^{201}Tl, ^{67}Ga, ^{111}In, ^{18}F, ^{51}Cr, ^{60}Co, ^{90}Y, bilo da ih injiciraju, pripravljaju, ili su u kontaktu s bolesnikom kojem je apliciran radionuklid u dijagnostičke ili terapijske svrhe.

Ad 2. Djelatnici odjela za fiziku vrše svakodnevno kontrolu kvalitete gama kamera, osnovnog uređaja u nuklearnoj medicini, pomoću radioaktivnog izvora. Sudjeluju također u mjerenjima bolesnika kojima je aplicirana radioaktivnost i susreću te iste bolesnike u ostalim prostorima Zavoda.

Ad 3. Djelatnici odjela za scintigrafiju spadaju u brojniju skupinu osoblja i njihov je osnovni zadatak stalna prisutnost uz bolesnika pri snimanju gama kamerama tijekom dijagnostičkih postupaka, te su zbog toga u stalnom kontaktu s raznim radioizotopima koji se koriste u nuklearno medicinskoj dijagnostici ili terapiji (opisani uz specijaliste).

Ad. 4. Djelatnici odjela za radiofarmake i radiokemiju prihvaćaju radioizotope koji dolaze u naš Zavod, skladište ih, pripravljaju i obilježavaju spojeve s radioaktivnim izotopima, te raspoređuju radiofarmake i radioizotope za svakodnevno korištenje.

Ad. 5. Djelatnici kliničkog odjela provode njegu ležećih bolesnika koji su tu smješteni prvenstveno zbog terapije radiojodom. Na kliničkom odjelu postoji i posebna izolacijska soba sa zatvorenim kanalizacijskim sustavom

zbog odstojavanja izlučevina u koju se smještaju bolesnici s visokim terapijskim dozama a osoblje je s tim bolesnicima u stalnom kontaktu.

Ad. 6. Djelatnici na ultrazvuku dolaze u kontakt s bolesnicima kojima je apliciran radiofarmak u svrhu terapije ili dijagnostike. Također su u kontaktu u ostalim dijelovima Zavoda s bolesnicima kojima su aplicirani radiofarmaci bilo zbog liječenja ili dijagnostike.

Ad. 7. Spremačice uklanjaju radioaktivni otpad i čiste sva radilišta unutar Zavoda, nose na skladištenje i odstojavanje radioaktivni pribor i upotrijebljene šprice, igle, rukavice. Čiste prostore i uklanjaju i čiste mjesta eventualne kontaminacije poda radioaktivnim materijalom. Kretanjem po prostorima Zavoda dolaze u kontakt s bolesnicima kojima je apliciran radioaktivni materijal.

Ad. 8. Administrativno osoblje na prijemnim šalterima dolazi u kontakt sa bolesnicima kojima je apliciran radioaktivni materijal i na taj su način svakodnevno u području ionizirajućeg zračenja.

REZULTATI

Raspodjela primljenih doza u dva petogodišnja razdoblja za svih 8 skupina zaposlenika prikazana je u Tablici 1.

Tablica 1. Prosječne doze po osobi u desetogodišnjem razdoblju

Osoblje po skupinama	**Ukupno osoblja**	**00.-04. g.** µSv	**05.-09. g.** µSv	**%**
1. Specijalisti nukl. med.	15	2273,47	2103,27	**7,49**
2. Djelatnici odjela za fiziku	6	1262,83	200,00	**84,16**
3. Djelatnici odjela za scintigrafiju	14	**28948,29**	**21866,71**	**24,46**
4. Djelatnici odjela za radiokemiju i radioimunologiju	10	**19661,70**	**17281,40**	**12,11**
5. Djelatnici kliničkog odjela	12	5232,75	2727,25	**47,88**
6. Spremačice	7	3120,57	567,14	**81,83**
7. Djelatnici na ultrazvuku	7	3465,12	863,48	**75,08**
8. Administrativno osoblje	9	3469,23	873,05	**74,83**
Ukupno	80			

Odmah se mora reći da su sve primljene doze u svakom od promatranih petogodišnjih razdoblja ne samo unutar dozvoljenih Zakonom propisanih granica za profesionalno izlaganje ionizirajućem zračenju, nego i daleko od gornjih granica.

Ipak unutar oba razdoblja značajno se ističu dva radilišta s višim osobnim očitanjima doza: odjel za scintigrafiju i odjel za radiofarmake i radioimunologiju.

Razlog tome treba tražiti u svakodnevnim radnim zadacima osoblja tih radilišta i tehnološkim procesima koji se tu odvijaju: priprema i injiciranje radiofarmaka, te rad s injiciranim bolesnikom. No i te doze daleko su od maksimalno dozvoljenih zakonom propisanih granica.

U drugom petogodišnjem razdoblju uočava se smanjenje svih prosječnih zabilježenih doza za sve kategorije djelatnika. Najmanji pad vrijednosti osobne dozimetrije zamijećen je kod liječnika specijalista nuklearne medicine, djelatnika odjela za scintigrafiju i odjela za radiofarmake i radioimunologiju. U 4 skupine zaposlenika, odjel za fiziku, spremačice, odjel za ultrazvuk i administrativno osoblje, nalazimo smanjenje registriranih doza od 75 % do čak 84 %.

ZAKLJUČAK

Analizirajući osobnu dozimetriju osoblja u desetogodišnjem periodu u našem Zavodu za nuklearnu medicinu, možemo biti zadovoljni sa zabilježenim vrijednostima primljenih doza koje su u dozvoljenim zakonskim granicama u svim skupinama zaposlenika. Mislimo da je to prvenstveno posljedica dobre osobne zaštite (olovne pregače, rukavice, olovni štitnici za injekcije, olovne staklene pregrade kod obilježavanja radiofarmaka, olovne kutije za nošenje radiofarmaka i izotopa), ali i općih mjera zaštite od ionizirajućeg zračenja koje se moraju zakonski primijeniti u radu s radioaktivnim materijalom (olovni kontejneri za prenošenje radioaktivnog materijala, olovni štitnici za spremanje izvora zračenja, olovne pregrade uokolo gama kamera i mjesta za rad, itd.).

Isto tako potvrđuje se da zaista svi djelatnici koji svakodnevno dolaze u kontakt s bolesnicima kojima su aplicirani radiofarmaci moraju biti pod dozimetrijskom kontrolom. Zavisno o tehnološkim procesima i prirodi svakodnevnog posla uočavaju se pojedina radilišta s većim registriranim dozama, ali još uvijek u dozvoljenim granicama. Smatramo stoga, da gdje je

to moguće treba vršiti periodičku vremensku zamjenu radnih mjesta osoblja i na taj način preraspodijeliti opterećenje ionizirajućim zračenjem.

U drugom petogodišnjem razdoblju za sve zaposlenike u Zavodu zabilježeno je smanjenje vrijednosti osobnih doza. Ono se kreće od 7,5 % do čak 84 %. Uočili smo da je to smanjenje značajno veće u onih djelatnika koji po svojem profesionalnom osobnom obrazovanju nisu imali edukaciju o zaštiti od zračenja.

Prema sadašnjem Zakonu o zaštiti od zračenja obavezna je edukacija o zaštiti od zračenja, na početku rada s izvorima zračenja i obnova znanja svakih 5 godina. Smatramo da je provođenje zakonom propisane edukacije koju su prošli svi djelatnici također utjecalo na smanjenje doza jer su zaposlenici dobili potrebna znanja iz područja zaštite od ionizirajućeg zračenja. Osim toga edukacijom su i usvojili spoznaju da se od zračenja treba štititi osobnim zaštitnim sredstvima kao i da dobro planiranje radnog procesa također doprinosi zaštiti od ionizirajućeg zračenja.

LITERATURA

[1] Zakon o zaštiti od ionizirajućih zračenja. Narodne Novine 27/1999.

[2] International Atomic Energy Agency (IAEA): Applying Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine. Safety Reports Series No.40. Vienna: IAEA; 2005.

[3] Novaković M. Zaštita od ionizirajućih zračenja. Propisi u Republici Hrvatskoj s komentarima. Zagreb: Ekoteh-dozimetrija; 2001.

ANALYSIS OF PERSONAL DOSIMETRY FOR NUCLEAR MEDICINE STAFF IN TEN-YEAR PERIOD

Mirjana Poropat[1,2], Damir Dodig[1,2], Martina Ciglar[1] and Stanko Težak[1]
[1]Department of Nuclear Medicine and Radiation Protection,
University Hospital Centre Zagreb, Zagreb, Croatia
[2]School of Medicine, University of Zagreb, Zagreb, Croatia
mporopat@kbc-zagreb.hr

The aim of this study was to assess the value of personal dosimetry for nuclear medicine personnel in our department in a ten-year period.

We have analyzed personal doses for 80 employees in nuclear medicine in a ten year period that we divided into two five year periods (from 2000 to 2004 and from 2005 to 2009). The personnel was dived into 8 groups according to their working assignments due to different radiation exposure from various radioisotopes in different wards in nuclear medicine: nuclear medicine specialists, technologists in scintigraphy ward, personnel of physics ward, ward for radiochemistry and radioimmunology, clinical ward and ultrasound ward, cleaning personnel, administrative personnel. We have compared average dose per person in particular ward in two five year periods. All doses for all personnel were in the permissible limits prescribed by the authorities.

Higher average dose per person in a first five year period was detected in two wards, scintigraphy ward and ward for radiochemistry and radioimmunology due to the nature of their working assignments (preparation and application of radiopharmaceuticals, contact with patients who have received radiopharmaceutical).

The decrease in the average dose per person was noticed in a second five-year period, especially in the wards with personnel that had no prior education in ionizing radiation protection. The decrease of dose was from 7.5 % to 84.2 %.

We think that the decrease of average dose per person in a second five-year period was not only the result of the increased personal protection measures but also the result of continuing education of nuclear medicine personnel that is obligatory by the Law for ionizing radiation protection from year 1999, and the results from a ten-year period show its positive effect on radiation protection.

ZAŠTITA OD ZRAČENJA TIJEKOM PROIZVODNJE RADIOFARMACEUTIKA NA CIKLOTRONU

Hrvoje Prpić[1], Alfred Švarc[2], Branko Vekić[2] i Robert Bagarić[2]
[1]Ruđer Medikol Ciklotron d.o.o., Zagreb
[2]Institut Ruđer Bošković, Zagreb
hrvoje.prpic@rmc.hr

UVOD

Pozitronska emisijska tomografija je postupak kojim se dijagnosticira i prati značajan broj onkoloških bolesti, te se također koristi u dijagnostici kardioloških i neuroloških poremećaja. Najčešće korišten radionuklid je ^{18}F koji se proizvodi u ciklotronskom akceleratoru p,n reakcijom iz obogaćene vode $H_2{}^{18}O$, a kemijskom sintezom se ugrađuje u više radiofarmaceutika od kojih je u najširoj upotrebi FDG (fludeoksiglukoza).

Djelatnici koji obavljaju proizvodnju radiofarmaceutika FDG-RMC na proizvodnom postrojenju Ruđer Medikol Ciklotron d.o.o. (RMC) izloženi su mogućem štetnom utjecaju γ-zračenja koje nastaje na dva odvojena načina:

1. prilikom rada ciklotrona

a) primarno radioaktivno zračenje nastalo zaustavljanjem 18 MeV-skih protona

b) sekundarno radioaktivno zračenje nastalo zaustavljanjem $^{18}O(p,n)^{18}F$ reakcijom nastalih neutrona

2. raspadom namjenski stvorenog radioizotopa ^{18}F, i to:

a) tijekom njegovog transporta od ciklotronske dvorane do vrućih ćelija,

b) tijekom kemijske sinteze radiofarmaceutika FDG-RMC,

c) tijekom pakiranja i transporta gotovog proizvoda,

d) tijekom kontrole kvalitete u laboratoriju.

Svrha ovog rada je prikazati apsorbiranu dozu zračenja za djelatnike, tijekom tri mjeseca redovne proizvodnje radiofarmaceutika FDG-RMC, te usporediti izmjerene vrijednosti s apsorbiranim dozama koje su procijenjene tijekom postupka ishođenja dozvole za rad.

MATERIJAL I METODE

Mjerenje brzina doza γ-zračenja, koje su polazna točka za procjenu ukupno primljenih doza djelatnika RMC na svim definiranim radnim zadacima, u postupku ishođenja dozvole za rad, obavio je ovlašteni servis za

obavljanje stručnih poslova zaštite od ionizirajućeg zračenja EKOTEH dozimetrija d.o.o. Brzine doza γ-zračenja mjerene su korištenjem uređaja Thermo Radiameter FH 40-L10, ser. br. 20268. Mjerenja su izvršena pri maksimalnoj produkciji ciklotrona, istovremenim ozračivanjem dvije mete (oznake XXL) s dva snopa protona intenziteta 75 μA, pri čemu je proizvedeno 370 GBq (10 Ci) ^{18}F [1].

Procjena radiološke zaštite obavljena je prema sljedećim radnim zadacima i mjestima:

Operater 1

a) prilikom redovnog dnevnog rada na ciklotronu – 2 h dnevno u ciklotronskoj dvorani (55 dana)
b) prilikom obavljanja servisa i održavanja:
   i. ciklotron – ukupno 6 h kvartalno u radionici
   i.i. radionica – ukupno 6 h kvartalno u radionici

Operater 2

a) za vrijeme redovnog dnevnog rada na sintezi FDG–RMC – 0,5 h dnevno u prostoru proizvodnje (27,5 dana)
b) za vrijeme redovnog dnevnog doziranja FDG–RMC – 0,5 h dnevno u prostoru proizvodnje (27,5 dana)
c) za vrijeme čišćenja i pripreme vrućih ćelija – ukupno 5 h kvartalno u prostoru proizvodnje
d) prilikom redovnog dnevnog rada na pakiranju gotovog proizvoda u rostoru za opremanje gotovog proizvoda – 0,5 h dnevno (27,5 dana)

Operater 3

a) prilikom unosa aktivnosti – 10 min dnevno u laboratoriju (55 dana)
b) prilikom vršenja mjerenja – 1 h dnevno u laboratoriju (55 dana)

Tijekom tri mjeseca redovne proizvodnje (1. 11. 2010. – 31. 1. 2011.) apsorbirana doza djelatnika registrirana je pomoću termoluminiscentnih dozimetara na bazi LiF:Mg,Ti, proizvođača Harshaw (TLD-100, tip: BG0110). Dozimetri su očitavani pomoću 2 automatska čitača osobnih dozimetara (Harshaw 6600) kod ovlaštene službe pri Institutu Ruđer Bošković.

REZULTATI

U Tablici 1 prikazana je procijenjena apsorbirana doza, čije su vrijednosti dobivene jednokratnim mjerenjem brzine doze pri proizvodnji 370 GBq (10 Ci) ^{18}F tijekom postupka ishođenja dozvole za rad [1], uz prethodno definirane duljine boravka u ozračenom radnom prostoru.

Tablica 1. Procjena apsorbirane doze radioaktivnog zračenja

Radno mjesto	Opis posla	Radno mjesto	Trajanje dnevno (h)	Brzina doze (μSv/h)	Dnevna doza (μSv)	Broj dana tromjesečno	Tromjesečna doza po djelatnosti (mSv)	Ukupna tromjesečna doza po djelatniku (mSv)
Operater 1	Upravljanje ciklotronom	Kontrolna soba	2,00	0,18	0,36	55,0	0,02	0,29
	Servis i održavanje	Ciklotron	2,00	30,00	60,00	3,0	0,18	
	Servis i održavanje	Radionica	2,00	15,00	30,00	3,0	0,09	
Operater 2	Čišćenje i priprema vrućih ćelija	FDG Proizvodnja	0,50	0,50	0,25	10,0	0,003	1,46
	Sinteza FDG	FDG Proizvodnja	0,50	2,10	1,05	27,5	0,03	
	Doziranje FDG	FDG Proizvodnja	0,50	2,10	1,05	27,5	0,03	
	Pakiranje gotovog proizvoda	Tehnički prostor	0,50	102,00	51,00	27,5	1,40	
Operater 3	Kontrola kvalitete	Unos materijala	0,17	20,00	3,40	55,0	0,19	0,74
		Ispitivanje	1,00	10,00	10,00	55,0	0,55	

Od 1. 11. 2010. do 31. 01. 2011. godine proizvedene su 62 serije FDG–RMC. Tijekom ovog razdoblja proizvedeno je na ciklotronu ukupno 16 280 GBq (440 Ci) ^{18}F, odnosno prosječno po seriji 262,6 GBq (7,1 Ci) ^{18}F.

Izmjerene apsorbirane doze po operateru tijekom tri mjeseca redovne proizvodnje prikazane su u Tablici 2, dok je usporedba procijenjenih godišnjih apsorbiranih doza prikazana u Tablici 3.

Proizvodnja ^{18}F odvija se na ciklotronu IBA Cyclone 18/9 unutar ciklotronske dvorane koja je izgrađena od betonskih zidova debljine dva metra. Apsorbirana doza operatera koji radi na ciklotronu tijekom tri mjeseca iznosi 0,03 mSv, temeljem čega je očekivana godišnja doza oko 0,12 mSv. Operateri u proizvodnji (Operater 2A i Operater 2B) izloženi su potencijalnom zračenju tijekom postupka kemijske sinteze i doziranja lijeka, pri čemu su zaštićeni olovnim vratima vrućih ćelija debljine 90 mm, te su u postupku proizvodnje najviše izloženi radioaktivnom zračenju u procesu pakiranja gotovog proizvoda. Apsorbirana doza za Operatera 2A tijekom tri mjeseca iznosi 0,22 mSv, dok je u Operatera 2B 0,14 mSv, a procijenjene godišnje apsorbirane doze iznose 0,88 mSv, odnosno 0,56 mSv. Operater 3 zadužen je za kontrolu kvalitete i jedini je djelatnik koji dolazi u direktan kontakt s

otvorenim izvorima zračenja. U postupku rada, djelatnik je dodatno štićen olovnim blokovima i olovnim staklom, a izmjerena apsorbirana doza tijekom tri mjeseca proizvodnje iznosi 0,46 mSv, a procijenjena godišnja apsorbirana doza je 1,84 mSv.

Tablica 2. Izmjerene apsorbirane doze radioaktivnog zračenja

	Stu-10	Pro-10	Sij-11	Ukupna tromjesečna doza
		(μSv)		(mSv)
Operater1	20	10	0	0,03
Operater 2A	90	100	30	0,22
Operater 2B	70	40	30	0,14
Operater 3	150	180	130	0,46

Tablica 3. Procjena godišnjih apsorbiranih doza po djelatniku

	Procjena temeljem sigurnosne analize	Procjena temeljem izmjerenih vrijednosti
	(mSv)	(mSv)
Operater 1	1,16	0,12
Operater 2A	5,85	0,88
Operater 2B	5,85	0,56
Operater 3	2,95	1,84

ZAKLJUČAK

Rekonstrukcija postojeće ciklotronske zgrade na Institutu Ruđer Bošković provedena je u skladu sa zahtjevima zaštite od zračenja definiranim u Članku 5. Pravilnika o granicama izlaganja ionizirajućem zračenju te o uvjetima izlaganja u posebnim okolnostima i za provedbe u izvanrednom događaju: "Efektivna doza izloženih radnika ne smije u normalnim uvjetima tijekom rada biti veća od 100 mSv u razdoblju od pet uzastopnih godina, uz uvjet da niti u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja efektivna doza ne smije biti veća od 50 mSv" [2]. Nadalje, u provedbi zaštite od zračenja dosljedno je proveden koncept ALARA ("*As Low As Reasonably Achievable*"), tako da su granice propisane zakonom samo maksimalno dozvoljene granice, dok je cilj zaštite da se ukupno primljena doza smanji što je moguće više.

Dobiveni rezultati primljenih apsorbiranih doza tijekom tri mjeseca redovne proizvodnje ukazuju na znatno niže vrijednosti od očekivanih koje su bile procijenjene tijekom postupka ishođenja dozvole za rad. Djelatnik na ciklotronu (Operater 1) primio je 10 % očekivane doze (0,03 mSv *vs* 0,29 mSv) kao i Operateri 2A i 2B (0,22 mSv; 0,14 mSv *vs* 1,46 mSv). Razlog nižih vrijednosti apsorbiranih doza dijelom je posljedica manje prosječne aktivnosti proizvedenog ^{18}F na ciklotronu tijekom redovne proizvodnje: 262,6 GBq (7,1 Ci) u odnosu na postupak ishođenja dozvole za rad: 370 GBq (10 Ci). Također, u postupku pakiranja gotovog proizvoda, provedene su dodatne mjere zaštite, kojima se značajno skraćuje vrijeme boravka u blizini gotovog proizvoda. Operater 3 koji je zadužen za kontrolu kvalitete jedini je djelatnik koji dolazi u direktan kontakt s otvorenim izvorom zračenja, a uzorci za kontrolu kvalitete jednaki su i neovisni o veličini proizvedene serije. Dobivena vrijednost apsorbirane doze tijekom tri mjeseca iznosi 0,46 mSv, što je oko 63 % procijenjene doze (0,74 mSv), i rezultat je radnog iskustva i prakse, čime se značajno skraćuje vrijeme boravka u laboratoriju i izloženost otvorenim izvorima zračenja. Prikazani rezultati odnose se na mjerenja tijekom tri mjeseca, pri jednoj dnevnoj proizvodnji radiofarmaceutika FGD–RMC. Očekivani rast potražnje radiofarmaceutika i proširenje prodaje na susjedna tržišta u regiji zahtijevati će i do tri dnevne proizvodnje. Projekcija izmjerenih apsorbiranih doza na godišnjoj razini za tri dnevne proizvodnje ukazuje da će Operateri 1 i 2 primati ukupnu dozu manju od 3 mSv, dok će Operater 3 pri radu u laboratoriju primiti do 5,5 mSv, što su značajno niže vrijednosti od zakonom dopuštenih (20 mSv godišnje). Postrojenje za proizvodnju radiofarmaceutika, Ruđer Medikol Ciklotron d.o.o., poduzetim mjerama za zaštitu od zračenja osigurava zadovoljavajuću zaštitu djelatnicima u proizvodnji. Usprkos navedenom, u skladu s konceptom ALARA, obveza je svih zaposlenih da se dodatnim mjerama zaštite primljena doza smanji što je moguće više.

LITERATURA

[1] Prpić H, Švarc F, Bagarić R. Ciklotron: proizvodnja radiofarmaceutika za potrebe zdravstva – procjena apsorbirane doze radnika. Arhiv za higijenu rada i toksikologiju 2010;61:Suppl.123-129.

[2] Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućeg zračenja za obavljanje djelatnosti s radioaktivnim izvorima. Narodne novine 125/2006.

RADIATION PROTECTION DURING CYCLOTRON PRODUCTION OF RADIOPHARMACEUTICALS

Hrvoje Prpić[1], Alfred Švarc[2], Branko Vekić[2] and Robert Bagarić[2]
[1]Ruđer Medikol Cyclotron Ltd., Zagreb, Croatia
[2]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
hrvoje.prpic@rmc.hr

Positron emission tomography (PET) is a radiological diagnostic procedure very suitable for follow up of many oncologic diseases, but can also be efficiently used in diagnostic and follow up of some cardiologic and neurologic diseases too. The most often used radiopharmaceutical, fludeoxyglucose F-18, is produced in the 18 MeV cyclotron in Ruđer Medikol Cyclotron d.o.o. (RMC) by the proton bombardment of enriched water $H_2{}^{18}O$. During the whole production cycle the operatives in charge of producing FDG-RMC are, however, exposed to potentially harmful γ-radiation generated either by the operation of cyclotron (proton induced primary, and neutron induced secondary), or to the decay of generated radioisotope ^{18}F, and for their full protection we have implemented the ALARA concept systematically. We have divided the cyclotron operators in three categories depending on the type of activities and the length of potential radiation exposure, and paid special attention to distribute their tasks in such a manner that the overall accumulated dose is approximately equal for all of them. Prior to full operation we have estimated the annual accumulated dose for each operator on the basis of maximum produced activity of 370 GBq (10 Ci) ^{18}F, and dose rate measurements performed by the approved service for radiation protection and radiation monitoring - EKOTEH dosimetry d.o.o. (Thermo Radiameter FH 40-L10, Ser. No. 20268). In this work we report the actual measurements for the period of first three months of regular production (1.11.2010.–31.1.2011.) done by thermoluminescent LiF:Mg,Ti dosimeters Harshaw (TLD-100, type: BG0110). The readings have been done by two automatic personal dosimeter readers Harshaw 6600 by the Ruđer Bošković Institute licensed service. The measured values were for the observed period much lower than the maximum estimated values, confirming our theoretical model and radiation protection scheme. We have also estimated the rise of absorbed doses due to probable increase in size of production, and concluded that the absorbed doses in these cases will also be within acceptable limits. Therefore, we conclude that the radiation protection at RMC is systematically kept well under legally allowed limits, and ALARA concept is fully implemented.

TOWARDS ESTABLISHMENT OF NATIONAL REFERENCE DOSE LEVELS FROM COMPUTED TOMOGRAPHY IN CROATIA – FIRST RESULTS

Branimir Klasić[1], Klaudija Višković[2], Zoran Brnić[1], Dario Posedel[3], Jelena Popić[1] and Mirela Šoštarec-Crnić[2]
[1]"Merkur" University Hospital, Zagreb
[2]University Hospital for Infectious Diseases "Dr. Fran Mihaljević", Zagreb
[3]EKOTEH dozimetrija d.o.o., Zagreb, Croatia
bklasic@net.amis.hr

INTRODUCTION

Computed tomography (CT) is a sectional imaging technique that uses a collimated X-ray beam perpendicular to the body axis to acquire image of a body slice of desired width. Attenuation of the beam on its way through the body is measured by crystal detectors situated on the opposite side from the X-ray tube. Based on the recorded attenuation values, a mathematically reconstructed image is obtained. Each CT image consists of separate elements (pixels) with a specific gray scale value.

CT is playing an increasingly important role in the diagnosis of a wide variety of disorders [1]. Since its introduction, it has been known that CT is related to high radiation dose to the patient. Expanding the use of this diagnostic modality resulted in making it a major source of radiation exposure to population from diagnostic X-rays. In countries with developed healthcare it contributes up to 41 % of the annual collective dose from medical radiation exposures [2].

Many ways are found in the literature to describe [3,4] and measure [5–8] radiation dose from CT. In an effort to further improve dose management in CT, European Commission published European Guidelines (EG) on quality criteria for CT [9]. EG proposed two dose descriptors normalized weighted computed tomography dose index ($_nCTDI_W$) and dose – length product (*DLP*), as reference dose levels (RDLs). The weighted CT dose index, $CTDI_w$, for a single slice in serial scanning or per rotation in helical scanning is (1):

$$CTDI_w = (1/3\ CTDI_c) + (2/3\ CTDI_p) \qquad (1)$$

The subscript "n" ($_nCTDI$) is used to denote when these measurements have been normalized to unit radiographic exposure (mAs).

The second reference quantity is the dose – length product (*DLP*), which includes the patient, or the phantom volume irradiated during a complete examination (2):

$$DLP = \sum_i CTDI_{w}i\ Ti\ Ni \qquad (2)$$

where, for each of *i* helical sequences forming part of an examination, *T* is the nominal irradiated slice thickness (cm) and *N* is the total number of slices for the sequence.

To compare radiological examinations in terms of radiation risk, taking into account the relative radio sensitivities of body regions involved, it is necessary to estimate effective dose *E*, which is the sum of the products of organ doses and corresponding weighting factors [9]. The effective dose estimate (3) was determined by using *DLP* measurements and appropriate normalized coefficients found in the European guidelines for CT [9] where E_{DLP} is the region specific normalized effective dose.

$$E = E_{DLP}\, DLP \qquad (3)$$

Those coefficients were 0.0023 mSv mGy^{-1} cm^{-1} for head CT, 0.017 mSv mGy^{-1} cm^{-1} for chest CT, and 0.015 mSv mGy^{-1} cm^{-1} for abdominal CT [9].

To our knowledge, there are no data currently available concerning nationwide patient doses from CT examinations in Croatia. The aim of the present work is to contribute to the establishment of diagnostic reference levels (DRLs) for various CT examinations in our country.

MATERIALS AND METHODS

Our survey was performed on the helical CT scanner Shimadzu X-ray CT system SCT-7800 T (Shimadzu, Japan). All measurements were performed during 2009 and 2010.

105 adult patients took part in our survey, 44 women (42 %) and 61 men (58 %). Mean patient age was 58, ranging from 21 to 94. Each patient signed the informed consent form.

Typical CT examinations, namely routine head, chest and abdomen, were selected for the study. For each examination, the parameters, such as kVp, mAs, number of slices, slice thickness, pitch and length of examined body segment were recorded.

$CTDI_{100}$ was measured with standard ionization chamber and Unfors Xi (Unfors, Sweden) measurement system. Radiation dose in mGy was multiplied with 10 cm length, equaling *CTDI* in mGy·cm. Results were normalized to 10 mm slice width. For our measurements we used standard polymethyl – methacrylate (PMMA) phantoms: body (320 mm in length and 160 mm in diameter) and head (160 mm in length and 160 mm in diameter). The ionization chamber used for measurements of air kerma was placed in holes extending through the length of the phantom at 3, 6, 9 and 12 hours and at the phantom's central axis.

Table 1. Protocols for typical CT examinations

	kV	**mAs**	***T***	***l***
ABDOMEN	120	250	10	1
THORAX	120	150	10	1
HEAD	120	250	5	1
		190	10	1

kV – kilovoltage, mAs – tube current – exposure time product, *T* – slice thickness, *l* – slice increment

We used standard exposure technique factors (kVp, mAs and slice thickness) that remained constant for each type of the examination, whereas only the number of slices varied from patient to patient.

RESULTS

The slice numbers, scanning length and number of phases are provided in Table 2 and measurement results are summarized in Table 3. For CT examinations performed with *i.v.* contrast media, the radiation dose was multiplied with a number of phases. The scanning length *L* was longest for abdominal CT scans, which was expected, since abdomen is the largest anatomical region. In the abdominal protocol, *L* also had a broadest range of values (22 – 66 cm), probably because of a variable size of the field of interest. *L* for thorax had narrower range (25 – 44 cm), mostly because of the difference in patient size. For head protocol, *L* was relatively constant (15 – 26 cm). Here we have to emphasize the importance of optimization of CT practices.

Table 2. Values of total number of slices *N* and irradiation length *L* (mm), with a number of phases *P* for each examination.

	N	***L*** (mm)	***P***
ABDOMEN	41	410	1 – 4
THORAX	32	320	1 – 2
$HEAD_{5mm}$	14	70	1 – 2
$HEAD_{10mm}$	10	100	1 – 2

Table 3. The dose to patients expressed in terms of $CTDI_w$ (mGy), *DLP* (mGy·cm) and effective dose *E* (mSv)

	$CTDI_w$	3rd quartile	*DLP*	3rd quartile	*E*	3rd quartile
ABDOMEN	35	40	1435	1640	21.53	24.6
THORAX	8.8	11.3	281.6	361.6	4.79	6.15
$HEAD_{5mm}$	61	80	854	1120	1.96	2.58
$HEAD_{10mm}$	27.6	35	276	350	0.63	0.81

Starting point for that is the training of radiology personnel. Properly educated technologist can adjust technical parameters and length of an irradiated part of the body, therefore reducing the dose burden. Radiologists are obliged to establish and use appropriate examination protocols. Through better cooperation with other clinical specialties, it is possible to narrow down the scanning area and lower the number of examination phases. That can also contribute to dose reduction.

Some examinations were performed in phases, before and after intravenous contrast media application. For such patients we doubled or tripled the radiation dose, depending on weather scanning was done in two or three phases.

The abdominal CT examination was significantly above the EC RDL concerning *DLP*, and slightly higher with *CTDI* values. That can probably be attributed to longer then needed examined body segment.

Table 4. Proposed European Commission *RDLs* and region specific normalized effective dose for some routine CT examinations

EXAMINATION	$CTDI_w$ (mGy)	*DLP* (mGy·cm)	E_{DLP} (mSv)
ABDOMEN	35	780	11.7
THORAX	30	650	11.05
HEAD	60	1050	2.42

Higher RDL-s were also recorded with a head CT. Since RDL-s act as parameters to help identify relatively poor or inadequate use of the technique, the exposure settings and the extent of the scan should be further investigated to lower the dose without affecting image quality. The large irradiation volume of investigations seems to be an important factor, since CTDI values are only slightly higher than RDL-s. Reducing the extent of the scanning area as much as possible, without missing any vital anatomical region, is required to lower *DLP* and *E*. Reducing mAs of the examination protocol is also important, especially for patients with slender physique and pediatric patients. Mayo et al. [11] presented a study regarding the minimum tube current required for good image quality with least radiation dose on chest CT examinations. Our $CTDI_w$ and *DLP* values of investigated chest examination protocol were below the EC RDL. It should be noted that CT RDL-s should be monitored at certain time intervals to constantly assure optimization of the procedure.

CONCLUSION

We believe that our measurements provide a good basis for further investigation of radiation doses from CT scanners in Croatia. We hope to expand our survey in near future to include more radiology departments in Zagreb and other regional medical centers in Croatia.

REFERENCES

[1] Castellano IA, Dance DR, Evans PM. CT dosimetry: getting the best from the adult Cristy phantom. Radiat Prot Dosim 2005;114(1-3):321-325.

[2] UNITED NATIONS. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Volume I: Sources. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nation Sales Publication, Sales No E.00.IX.3, New York, 2000.
[3] Spokas JJ. Dose descriptors for computed tomography. Med Phys 982;9:288-292.
[4] Shope TB, Gagne RM, Johnson GC. A method of describing the doses delivered by transmission X-ray computed tomography. Med Phys 1981;8:488-495.
[5] Shope TB, Morgan TJ, Showalter CK. Radiation dosimetry survey of computed tomography systems from ten manufacturers. Br J Radiol 1982;55:60-69.
[6] Calzado A, Ruiz Sanz S, Melchor M, Vano E. A comparison of measured and calculated organ doses from CT examinations. Radiat Prot Dosim 1995;57:381-385.
[7] Jones AP, Mott DJ, Parkinson L. Experience with a new simple method for the determination of doses in computed tomography. Radiat Prot Dosim 92;43:139-142.
[8] Shrimpton PC, Wall BF. Assessment of patient dose from computed tomography. Radiat Prot Dosim 1992;43:205-208.
[9] EUROPEAN COMMISSION. European Guidelines on Quality Criteria for Computed Tomography, Report EUR 16262. Brussels: EC, 1999.
[10] Tsapaki V, Aldrich JE, Sharma R, Staniszewska MA, Krisanachinda A, Rehani M, Hufton A, Triantopoulou C, Maniatis PN, Papailiou J. Dose reduction in CT while maintaining diagnostic confidence: diagnostic reference levels at routine head, chest, and abdominal CT-IAEA-coordinated Research Project. Radiology 2006;240(3):828-834.
[11] Mayo JR, Hartman TE, Lee KS, Primack SL, Vedal S, Müller NL. CT of the chest: minimal tube current required for good image quality with the least radiation dose. AJR Am J Roentgenol 1995;164(3):603-607.

IMAGE QUALITY IN SCREENING MAMMOGRAPHY IN CROATIA

Zoran Brnić[1], Ana Ljevar[2], Branimir Klasić[1] and Jelena Popić-Ramač[1]
[1]Department of Radiology, University Hospital "Merkur", Zagreb, Croatia
[2]Mammography Service, Public Healthcare Center "Centar", Zagreb, Croatia
zoran.brnic@zg.t-com.hr

INTRODUCTION

Mortality reduction through screening mammography (SMG) is possible only with examination of high image quality (IQ) [1], which should be performed with acceptable patient breast radiation dose (BRD). Besides film processing control, equipment assessment with breast phantom and dosimetry [2], periodical external mammographic IQ assessment (MIQA) is needed, including image labelling (L), breast positioning (BP), exposure (EX) and artefacts (AR) assessment [3]. The nationwide breast cancer screening program (NBSP) has been introduced in Croatia in 2006 [4], and the MIQA is initiated as the first step in establishing quality assurance/quality control (QA/QC) framework in breast imaging in Croatia. The current study was aimed: (1) to provide objective evidence about the technical MIQ in NBSP in Croatia, (2) to compare MIQ between different types of mammographic units (MUs), (3) to identify the common deficiencies, and (4) to propose corrective activities.

MATERIAL AND METHODS

Mammograms (MGs) for IQA were collected from a total of 84 MUs which participate in NBSP, which represents 70 % of all MUs nationwide: Twenty (20) in general and county hospitals (GH), 8 in university hospitals (UH), 25 in private clinics (PR), and 31 in primary healthcare centres (MC). A total of $84 \times 5 = 420$ MG examinations were reviewed. Each MU was requested to submit "what they consider to be their five best representative MGs, each one performed in one of five consecutive workdays". MIQA was done using viewbox dedicated for MG (Ultraviol, NGP 31m, Zgierz, Poland), with luminance of 5500 cd/m^2 [5], by two reviewers (radiologist and radiology technologist (RT)). IQ evaluation system (IQES) was developed specifically for Croatian NBSP, and compiled two standardised

clinical IQES available [5,6] considering also experience of other authors [3,7-9]. Image attributes were grouped in four categories: L, BP, EX and AR. In the L category the adequacy of identification (ID) of patient (PT), exam and MU were evaluated: PT name, additional PT identifier, date of exam, laterality and view, MU name, RT ID and cassette / screen ID, and radiographic technique. Each item was allocated 1 point if present as required. In the EX category following attributes were evaluated: optical density (OD), overall contrast, visibility of blood vessels and fibrous strands through dense glandular tissue (GT), visibility of GT through pectoral muscle (PM), visibility of skin structures along PM on mlo-view and visibility of skin outline. Each feature was scored with 1 point if appropriate. The score was diminished by 1 point if GT transparency was nonuniform, OD differed on > 1 film or motion blurr was present. In the BP category were PM presentation, breast tissue coverage, image symmetry and nipple presentation evaluated. Two reference lines, posterior nipple line (PNL) and nipple line (NL) were used in evaluation of PM [5,10-13], and scored as follows [5,10-14]: PM up to 1 cm above PNL with 1 point**,** down to PNL with 2 points, and down to NL with 3 points. PM width was assessed at superior film aspect. "A negative point" was applied if: PM width < 5 cm [8], retroglandular fat not seen, GT reaches posterior film aspect or compression of anterior GT was suboptimal. PM presentation on mlo-view was assessed according to [7]: convex anterior contour (type I) was scored with 1 point, while other types (II, III and IV) yielded no points. PM visibility on cc-view, inframammary angle on mlo-view, all medial breast tissue and all lateral GT visibility on cc-view, absence of skinfolds, presentation of nipples in profile [6] and absence of asymetry and cutoff were each scored with 1 point. In the last category ARs were scored as follows: complete absence of ARs with 2 points, scarce easily recognizable ARs which does not obscure anatomy or simulate lesion with 1 point, and many ARs which might simulate lesion or obscure anatomy with 0 points [9].

The total IQ score was returned as the sum from the four categories: 7 + 6 + 10 + 2 = 26. Prior to objective IQA, a "subjective quality grade" (SQG) was attributed to each sample as a subjective rating of the overall quality and diagnostic value of the examination, on 5-point ordinal scale (1 – unacceptable, 2 – barely acceptable, 3 – acceptable, 4 – good, 5 – excellent). The results were presented as percentages of MUs that fulfil the defined criteria in each category. Mean and median of the scores in each category for each type of MU, and mean of total score for all MUs were

returned. Statistical significance of the differences of percentages and means were checked by Mann-Whitney U-test. Correlations between total IQ score with scores of each category were calculated. Mean values of SQGs for each MU type and correlations with total IQ score were returned. The Spearman test was used for the correlation analysis.

RESULTS

Mean age of MG machines was 7.76 years (range 2 – 21), with no difference between four MU types (7.42; 8.47; 8.04; 7.47 for GH, UH, PR and MC, respectively, $p > 0.05$).

Best L practice was seen in UH and the worst in PR. PT name was inadequately labeled in 17 % GH, and 5 % UH. Birthyear was absent in 55 % of PR and MC, and 43 % GH. Exam date lacks in 25 % of GH and PR. Laterality and view-marks were inadequate in 26 % of non-academic MUs. RT ID was present in 38 % of UH, but rarely in PR. Radiographic technique was rarely evident in all MU. Facility name lacks in 50 % PR and only in 2 % UH.

Best BP was seen in UH, and the worst in GH, with insufficient PM appearance in 40 % cases from UH to 60 – 70 % from other MUs. Nipple was not in profile in 20 % UH and up to 40 % GH and PR. Skinfolds were seen in 25 % UH and 35 % GH and PR. Inframammary angle was seen in 50 % UH and 30 % MC, medial breast aspect in 25 % UH and 15 % PR, and lateral in 45 % UH and up to 25 % of others. PM on cc-view was seen in only 15 % UH and < 5 % others.

EX was satisfactory in 93 % GH, 95 % MC and PR and all UH and contrast in 71 % PR, 78 % GH and MC and 86 % UH. Dense GT was well penetrated in a half of all samples, and PM in 80 % samples. Skin appearance was adequate in 90 % of UH and 80 % of other MUs.

No critical AR were seen in 78 % GH, 81 % MC, 87 % PR and 92 % UH, while in 25 % samples from UH and PR no ARs were seen at all.

Mean total IQ scores were 12.8, 16.1, 13.0 and 13.7 for GH, UH, PR and MC, respectively. Total IQ score (mean ± SD) for all MUs was 13.5 ± 3.2. Mean SQG was 2.5, 2.8, 2.7 and 2.6 for GH, UH, PR and MC, respectively.

Significantly better ($p < 0.05$) L practices were seen in UH than in PR and in MC than in PR. Significantly better ($p < 0.05$) EX and contrast were seen in UH than in PR. Significantly better ($p < 0.01$) BP was seen in UH than in all other MUs. Significantly fewer ($p < 0.05$) ARs were seen in samples from UH than from GH. Significantly higher ($p < 0.05$) total IQ

score was found in UH than in all other MUs. SQG differences did not reach statistical significance.

The total IQ score correlated significantly with quality of ID ($r = 0.69$), the quality of EX ($r = 0.64$) and the most strongly with quality of BP ($r = 0.78$), while the correlation with AR was weak ($r = 0.35$). Significant correlations between objective total IQ score and SQG ($p = 0.71 – 0.83$) were found.

This very first study of MIQ in Croatia corroborated our intuitive impression of inadequate IQ, staff training and equipment in many MUs nationwide. As MIQ strongly influences BC detection rate [15-17], suboptimal QA/QC always carries a risk to compromise the success of NBSP.

Film L should be complete, legible and permanent with any information unequivocally comprehensive [18]. In many PR the name was cut off or printed poorly, while in those lacking ID cameras was handwritten and hardly legible. Lack of birth year arise the risk to confuse the women with identical or similar names. Patient current age given in years (*e.g.* 50), or the birth year truncated (1950 to '50) can lead to confusion. Laterality and view marks were not adequate in a quarter of non-academic MUs. Non-standard abbreviations "ml" or "lat" used for mlo-view, suggesting 90° lateral view which has not been used in SMG for years [14,19-21]. The mlo-angle enables RT to choose optimal obliquity in future exams, considering variations of PM orientation in different women [21] and helps radiologist to perceive 3D relationship in the breast; this information was however not given in any patient. The deficiencies in L considerably contributed to lower IQ observed in PR, and could be easily corrected with better training, organization and working discipline.

Along with BP and compression, film OD and contrast strongly influence small BC detection rate [15,16,22]. As only few MUs in Croatia regularly perform daily QC, OD is usually lower than recommended [23]. However, analysed on low-luminance view-boxes [24], such MGs may seem acceptable for radiologists unaware of specific requirements of MIQ. The best OD in UH may be due to properly selected and matched film/screens and good processors with fresh chemistry due to considerable daily throughput. Hospital radiologists are stricter in their MIQ demands, keeping RTs more alert and open for continuous education than in smaller MUs. OD would be even better if MG dedicated processors were available. Comparable to previous results [24] film contrast was suboptimal in many PR, because of objective (low gradient receptors), and subjective reasons.

Low film rejection rate in PR is due to absence of instantaneous radiologist-to-RT feedback about MIQ. Many RTs are unaware of importance of compression for sharpness, contrast and BRD reduction, especially in PTs with dense breasts. Poor BP skill and lack of cooperation and confidence between PT and RT may result in painful exam [25], which compromises compression. Deficiencies of EX and contrast should be corrected through introducing QA/QC also in small capacity MUs, applying stricter standards for equipment maintenance and additional RT training.

The adequacy of BP strongly determines the amount of glandular tissue (GT) imaged on MG, which influence the sensitivity of the method [16]. The presentation of pectoralis muscle (PM) is the main criterion of mlo-image quality. PM could be visualized down to the posterior-nipple line (PNL) in 50 % [3–7,13,26,27], and within 1 cm from PNL in over 80 % of women [3,27]. Convex PM anterior outline, wider PM at the top than at the bottom of the image and visualization of inframmamary angle are recommended [5]. Only in a half of mlo-images in our material PM was properly visualized, often seen only marginally in axilla, indicating poor RT's expertise. Rarely seen convex anterior PM border reflects that PM was not relaxed and shifted medially during compression [21]. Although depictable on cc-view in certain percentage of women [3,7,14,21], PM was rarely seen on cc-view in our study. Medial skin reflection was too often sacrificed in an attempt to cover properly lateral GT. Although PT body habitus and the lack of large image holders may be responsible for this deficiency, many RTs are not aware of that posteromedial part of the breast is an inherent "blind area" of mlo-view, hence imperatively must be seen on cc-view [6]. The consistent efforts to mobilize the lateral GT under compression plate often lacked. As described by other authors [28], BP deficiencies were considerably responsible for overall MIQ impairment, especially in PR and MC. These BP failures can be overcome by additional RTs' training and prompting to refer to relevant professional texts [3,7].

The majority of ARs were typical and easily recognizable, hence not critical for diagnosis. ARs which imitate microcalcifications or lesions were less frequent, as reported earlier [24] and urgent corrective actions were requested by phone in such cases. Low frequency of AR in UH reflects better care of screens/cassettes, available in many sets and more frequently renewed. In small-patient volume MUs ARs occur more frequently as RTs lack specific training for QA/QC in MG. The use of processors dedicated for MG only, better education of the staff and regular QA/QC in all MUs are necessary.

Our material reflects the circumstances in different types of MUs from wide geographical diversity. It is known that MUs with higher patient volume has lower IQ failure rates [29]. We found better MIQ in UH than in GH, due to better BP and less ARs. The difference is even more significant in comparison of UH with all non-academic MUs. Because of the best MIQ, substantial participation of UHs is desirable in NBSP, while MUs with unacceptable IQ should be disengaged if unable to correct the deficiencies.

CONCLUSIONS

Deficiencies in SMG, especially in ID and BP reflect different level of competency of radiological staff in Croatia. Differences in MIQ in various MU types are determined by their organization, equipment, education, working habits and motivation. More efforts are needed to train both RTs and radiologists to implement and maintain QA/QC in their institutions.

REFERENCES

[1] Feig SA. Screening mammography: effect on image quality on clinical outcome. Am J Radiol AJR 2002;178:805-807.

[2] Hendrick RE, Botsco M, Plott CM. Quality control in mammography. Radiol Clin North Am 1995;33:1041-1057.

[3] Basset LW. Clinical image evaluation. Rad Clin North Am 1995;33:1027-1039.

[4] Ciraj-Bjelac O, Faj D, Stimac D, Kosutic D, Arandjic D, Brkic H. Good reasons to implement quality in nationwide breast cancer screening programs in Croatia and Serbia: Results from a pilot-study. Eur J Radiol 2009; in press.

[5] American College of Radiology. Mammography quality control manual. Reston, VA, American College of Radiology, 1999.

[6] European Commission. European guidelines on quality criteria for diagnostic radiographic images. EUR 16260, 1996.

[7] Eklund GW, Cardenosa G, Parsons W. Assessing adequacy of mammographic image quality. Radiology 1994;190:297-307.

[8] Bentley K, Poulos A, Rickard M. Mammography image quality: analysis of evaluation criteria using pectoralis muscle presentation. Radiography; 2008:14:189-194.

[9] Hogge JP, Palmer CH, Muller CC, Little CT, Smith DC, Fatouros PP, Shaw de Paredes E. Quality assurance in mammography: artefact analysis. Radiographics 1999;19:503-522.

[10] Royal Australian and New Zealand College of Radiologists. Mammography quality control manual. RANZCR; 2002.

[11] National Accreditation Standards BreastScreen Australia Quality Improvement Program. Australian Government Department of Health and Ageing; 2006.

[12] National Health Service Breast Screening Program. Quality assurance guidelines for mammography including radiographic quality control.

National quality assurance coordinating group for radiography. NHSBSP Publication No. 63; 2006.
[13] Naylor SM, York J. An evaluation of the use of pectoralis muscle to nipple level as a component to assess the quality of the medio-lateral oblique mammogram. Radiography 1999;107-110.
[14] Bassett LW, Hirbawi IA, DeBruhl N, Hayes MK. Mammographic positioning: evaluation from the view box. Radiology 1993;188:803-806.
[15] Young KC, Wallis MG, Ramsdale ML. Mammographic film density and detection of small breast cancers. Clin Radiol 1994;49:461-465.
[16] Taplin SH, Rutter CM, Finder C, Mandelson MT, Houn F, White E. Screening mammography: Clinical image quality and the risk of interval breast cancer. Am J Radiol AJR 2002;178:797-803.
[17] Kopans DB, Feig SA. The Canadian National Breast Cancer Screening Study: a critical review. Am J Radiol JR 1993;161:755-760.
[18] Food and Drug Administration. Quality Mammography Standards. Final rule–21 CFR part 16 and 900 [Docket no. 95N–0192. RIN 0910–AA24], Washington, DC; Department of Health and Human Services; 1997.
[19] Bassett LW, Gold RH. Breast radiography using oblique projection. Radiology 1983;149:585-587.
[20] Kopans DB. Standardized mammography reporting. Radiol Clin North Am 1992;30:257-264.
[21] Eklund GW, Cardenosa G. The art of mammographic positioning. Radiol Clin North Am 1992;30:21-53.
[22] Buist DSM, Porter PL, Lehman C, Taplin SH, White E. Factors contributing to mammography failure in women aged 40- 49. J Natl Cancer Inst 2004;96:1432-1440.
[23] European guidelines for quality assurance in breast cancer screening and diagnosis. 4th edition. Luxembourg, Belgium, European Communities, 2006.
[24] Faj D, Posedel D, Štimac D, Ivezić Z, Kasabašić M, Ivković A, Kubelka D, Ilakovac V, Brnić Z, Ciraj-Bjelac O. Survey of mammography practice in Croatia: equipment performance, image quality and dose. Rad Prot Dosim 2008;131:535-540.
[25] Keemers-Gels ME, Groenendijk RPR, van den Heuvel JHM, Boetes C, Peer PGM, Wobbes T. Pain experienced by women attending breast cancer screening. Breast Cancer Research Treatment 2000;60:235-240.
[26] Huynh PT, Jarolimek AM, Daye S. The false negative mammogram. Radiographics 1998;18:1137-1154.
[27] Bassett LW, Jessop NW, Wilcox PA. Mammography film-labelling practices. Radiology 1993;187:773-775.
[28] Pfendzelter R, Wuelfing U, Boedeker B, Heywang-Koebruner S. Diagnostic image quality of mammograms in German out-patient medical care. RoFo 2010;182:993-1000.
[29] Hendrick RE. Mammography quality assurance: current issues. Cancer Suppl 1993;72:1466-1474.

PATIENT DOSE CONSIDERATIONS IN INTERVENTIONAL CARDIOLOGY

Olivera Ciraj-Bjelac, Stefan Rafajlović, Danijela Aranđić, Duško Košutić and Milojko Kovačević
Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia
ociraj@vinca.rs

INTRODUCTION

Interventional cardiology procedures are classified as high-dose procedures, owing to increased risk for radiation skin injuries and stochastic effects, such as cancer [1]. European MED Directive 97/43 requires special consideration and dose evaluation for this kind of procedures [2].

Many international and national studies investigated radiation dose to patient during fluoroscopy guided cardiology procedures [1,3-9]. Dose received by a patient, in general, depends on the radiological equipment, examination protocol, the way it is implemented, the patient's body weight and nature of disease. Long-term fluoroscopy of certain parts of the body, a significant body mass, high-value dose intensity, continuous rather than pulsed fluoroscopy, small focus-skin distance and repeated procedure on the same patient, are among the factors that can lead to radiation skin injuries [6,7]. A particular challenge is the fact that the radiation damage of the skin is difficult to detect and connect to the previously conducted cardiologic procedures. Deterministic injuries are related to radiation-induced reproductive sterilization of cells. This is not expressed clinically until unsuccessful attempt of these cells to divide, which is subject to biological variation. Dose threshold exists for such injuries. However, the fact that such injuries do not have immediate manifestation is very often reason that many of them remain undetected [10].

The purpose of this work is to assess the level of radiation dose to patients in percutaneous coronary interventions (PCI) in a large cardiac centre and to investigate possibility for setting of a practical trigger value if dose quantities exceed certain levels in terms of dose descriptors available at display of interventional cardiology unit.

MATERIAL AND METHODS

Two dedicated interventional cardiology units in a large teaching cardiac centre (Clinical Centre of Serbia, Belgrade, Serbia) were included in the survey. Both rooms (D and F) were equipped with X-ray units of the identical model: Siemens Axiom Artis (Siemens, Erlangen, Germany) with the flat panel detector and integrated ionization chamber to measure air kerma-area product (P_{KA}) and air kerma in international reference point (K_{IRP}).

P_{KA} is an integral indicator of the duration of the procedure, its complexity, fluoroscopy modalities used and the number of acquisition series. However, it does not provide information on possible radiation injury of the skin, in particular, in interventional cardiology where a number of different projections are typically used. Skin dose can be assessed using radiochromic films [3–5,9,11], however, this cannot be applied routinely. Thus, measurement of K_{IRP} and other dose indices is aimed to provide a reasonably good assessment of the risks for tissue reactions, but it does not provide information on dose distribution to the patient's skin. In the absence of ideal dosimetry concept, both quantities, P_{KA} and K_{IRP}, together with the total fluoroscopy time are corsets for the determination of dose levels in interventional cardiology, primarily as an indicator of possible radiation injuries.

Patient doses were assessed in terms of P_{KA}, K_{IRP} and maximum-skin dose (MSD). P_{KA} and K_{IRP} were assessed using a built-in, *in situ* calibrated dosimeters, while MSD was estimated using radiochromic films, Gafchromic XR – RV2 (International Speciality Products, Wayne, USA). For each patient, a film of size 35 cm × 43 cm was placed on patient table, just under the patient.

Calibration of dosimeters in terms of P_{KA} and K_{IRP} was performed on site, using a procedure for field calibration of under couch installations described elsewhere [11]. A solid state dosemeter R-100 Barracuda (RTI Electronic, Molndal, Sweden) was used as a reference dosimeter for air kerma measurement, while the file size was measured using radiographic film.

Gafchromic films were calibrated at Secondary standard dosimetry laboratory in a beam quality representative for interventional procedures. Film pieces of 2 cm × 2 cm size were positioned in a way to minimise the contribution from scattered radiation, and exposed to known air kerma in the range of 0 – 6000 mGy. A reference ionisation chamber Magna A650 with Unidos T10002 electrometer (PTW, Freiburg, Germany) was used for air kerma measurement. Exposed film pieces were read 24 h after exposure in the reflection mode using HP Scanjet G3110 flatbed scanner. A TIF

format with 48–bit RGB resolution enabled the use of the red component for calibration and dose evaluation. Freeware ImageJ software was used for image analysis. The net mean pixel value (*NMPV*) was calculated using the equation:

$$NMPV = k\frac{MPV_{un\exp}}{MPV_{\exp}} \quad (1)$$

where MPV_{unexp} is the mean pixel value obtained in unexposed film (background), MPV_{exp} is the mean pixel value obtained after radiation exposure and k is a constant term having the value 10^4 [4].

Dose levels were measured for total of 27 patients undergoing PCI in two cardiology rooms during September and October 2010.

RESULTS

Table 1 shows the data related to dosimetry considerations of 27 patients undergoing PCI.

MSD in three patients (11 %) was higher than 3 Gy, while in 5 patients (19 %) MSD was higher than 2 Gy. In 19 patients (70 %), *MSD* was less than 1 Gy.

Correlations between different dose descriptors are presented in Figures 1 – 3. In spite of assumption that K_{IRP} is merely a conservative estimator of *MSD* [7], in this study cases where *MSD* was significantly higher than K_{IRP} were observed, while mean K_{IRP} / *MSD* ratio in was 0.84. This could be explained by the variable geometric conditions in interventional cardiology that may bring the point in which X-ray beam enters the body closer to or further from focus than point in which K_{IRP} calibration was performed. Also, this calibration assumes scatter free condition, however, the forward and backward scatter contributions are significant, ranging to more than to 50 % (scatter factor 1.58) [3].

As presented in Figures 1 – 3, correlation between *MSD* and other dosimetry indices was reasonably good, but different for different cardiology units. Many similar studies failed to prove significant correlations between dose descriptors in interventional cardiology [3-5]. Therefore, before setting trigger level for skin effects in terms of other quantities available in dose records, there is a need to assess a local practice and establish correlations for each procedure in each particular unit.

Based on MSD threshold of 3 Gy [10], trigger levels in terms of P_{KA}, K_{IRP} and fluoroscopy time are given in Table 1.

Table 1. Patient and technique related parameters and patient dose levels for 27 patients during PCI procedure in two cardiology rooms

	Unit D (N = 13)						
	Weight (kg)	**Height** (cm)	**Fluoroscopy time** (min)	**Number of frames**	P_{KA} (Gy·cm^2)	K_{IRP} (Gy)	***MSD*** (Gy)
Minimum	60	153	3.7	384	22	0.45	0.20
Maximum	100	183	23	1221	161	3.1	3.0
Mean	82	171	12	819	76	1.6	1.4
SD	12	8	6.2	276	41	0.81	0.86
Median	80	174	12	765	73	1.52	1.0
Trigger level	/	/	**18**	/	**120**	**2.5**	**3.0**
	Unit F (N = 14)						
Minimum	58	152	2.5	375	28	0.33	0.16
Maximum	104	186	69	1033	354	5.1	6.7
Mean	78	167	12	625	74	1.0	0.98
SD	14	10	16	176	84	1.2	1.6
Median	71	169	7.6	650	46	0.63	0.45
Trigger level	/	/	**32**	/	**170**	**2.5**	**3.0**

Figure 1. Correlation between maximum skin dose and cumulative air kerma at interventional reference point (IRP) for 27 PCI procedures in two cardiology rooms

Figure 2. Correlation between maximum skin dose and air kerma area product for 27 PCI procedures in two cardiology rooms

Figure 3. Correlation between maximum skin dose and fluoroscopy time for 27 PCI procedures in two cardiology rooms

CONCLUSION

Although utilisation of XR–RV2 radiochromic film has been proven as a good dosimetric method for mapping skin doses in patients during interventional cardiology procedures, it is not practical and cost-effective to be used routinely. In this study, correlation between alternative dose descriptors (*MSD*, K_{IRP}, P_{KA} and fluoroscopy time) was reasonable good, indicating that quantities available on the display of X-ray unit can be used for prediction of MSD if this correlation is confirmed for each particular unit. As readily available, they can alert operating staff that skin dose has reach threshold for manifestation of harmful tissue reactions.

REFERENCES

[1] Balter S, Hopewell JW, Miller DL, Wagner LK, Zelefsky MJ. Fluoroscopically guided interventional procedures: a review of radiation effects on patients' skin and hair. Radiology 2010;254:326-334.

[2] European Commission, Council Directive 97/43/Euratom on Health Protection of Individuals against the Dangers of Ionising Radiation in Relation to Medical Exposure. Official Journal of the European Communities No L180/22–27, Luxembourg, 1997.

[3] Neil S, Padgham C, Mertic C. A study of the relationship between peak skin dose and cumulative air kerma in interevnationla neororadiology and cardiology. J Radiol Prot 2010;30:659-672.

[4] Ying K, Kandaiya S. Patient skin dose measurements during coronary interventional procedures using Gafchromic film. J Radiol Prot 2010;30:585-596.

[5] Zontar D, Kuhelj D, Skrk D, Zdesar U. Patient peak skin dose from cardiac interventional procedures. Radiat Prot Dosim 2010;139:262-265.

[6] Tsapaki V, Ahmed NA, AlSuwaidi JS, Beganovic A, Benider A, BenOmrane L, Borisova R, Economides S, El-Nachef L, Faj D, Hovhannesyan A, Kharita MH, Khelassi-Toutaoui N, Manatrakul N, Mirsaidov I, Shaaban M, Ursulean I, Wambani JS, Zaman A, Ziliukas J, Zontar D, Rehani MM. Radiation exposure to patients during interventional procedures in 20 countries: initial IAEA project results. Am J Roentgenol 2009;193:559-569.

[7] International Atomic Energy Agency. Establishing guidance levels in X ray guided medical interventional procedures: a pilot study, IAEA Safety Report 59. IAEA, Vienna 2009.

[8] Balter S, Miller DL, Vano E, Ortiz Lopez P, Bernardi G, Cotelo E, Faulkner K, Nowotny R, Padovani R, Ramirez A. A pilot study exploring the possibility of establishing guidance levels in X-ray directed interventional procedures. Med Phys 2008;35:673-680.

[9] Faj D, Steiner R, Trifunovic D, Faj Z, Kasabasic M, Kubelka D, Brnic Z. Patient dosimetry in interventional cardiology at the University hospital of Osijek. Radiat Prot Dosim 2008;128:485-490.

[10] Miller DL, Balter S, Schueler BA, Wagner LK, Strauss KJ, Vañó E. Clinical radiation management for fluoroscopically guided interventional procedures. Radiology 2010;257:321-332.

[11] International Atomic Energy Agency. Dosimetry in diagnostic radiology: an international code of practice. IAEA Technical Report Series 457. IAEA, Vienna 2007.

OPTIMIZATION OF PATIENT DOSES IN INTERVENTIONAL RADIOLOGY AND CARDIOLOGY

Denisa Nikodemová[1] *and Karol Böhm*[2]
[1]Slovak Medical University in Bratislava, Bratislava, Slovakia
[2]Public Health Authority of the Slovak Republic, Bratislava, Slovakia
denisa.nikodemova@szu.sk

INTRODUCTION

Interventional radiology and cardiology belongs to the imaging modalities connected with significantly higher radiation exposure of patients and medical staff, compared to the exposure during other diagnostic procedures [1].

The objective of this presentation is to promote typical technical parameters and parameters related to the radiation policy, used during the most frequent endovascular and cardiology procedures, as well as the monitoring of the exposure of patients. The presented study reports the results of collecting the data of monitoring doses received by 318 patients undergoing interventional examinations in 3 various departments of the Slovak National Institute of Cardiology and Vascular Diseases. There were 9 different endovascular and cardiology procedures reviewed. The reported patient's radiation exposures were established by using the *KAP* values, directly shown on the display of the X-ray equipment. From the measured *KAP* values the entrance surface doses were calculated. Equivalent doses have been measured on hands, legs and other parts of medical staff body, by using electronic dosimeters or thermoluminescent dosimeters.

The presented results have covered a wide range of the measured fluoroscopy time values, different number of acquisitions used in various interventional procedures, various cumulated *KAP* values and also a wide range of the cumulated entrance surface doses. The occupational doses of the operators, followed during dose measurements on their left hands, covered the range from 0.1 μSv to 1513 μSv for one examination performed.

The important contribution of the presented results to the radiation protection policy in the Slovak Republic is the mapping of the current situation of the radiation exposure of patients undergoing the chosen interventional examinations and the professional radiation exposure level of

interventional operators, providing the most significant interventional procedures in the Slovak interventional hospitals. The obtained results also make possible to implement the basic optimization process into the clinical practice of interventional radiological departments and in this way to reduce the collective dose of the Slovak population from interventional radiological examinations.

MATERIALS AND METHODS

The measurements of patient and staff doses during selected interventional radiology and cardiology procedures were mainly conducted with highly specific equipment at the Slovak National Institute of Cardiology and Vascular Diseases in Bratislava, *i.e.*:

- Siemens Axiom Artis dTA
- Siemens Axiom Artis dFC
- Siemens COROSCOP

These X-ray systems are specifically designed for interventional radiology, fully digitalized and properly calibrated. The following exposure parameters were entered into the prepared unified protocols: fluoroscopy time (*FT*), number of cine-frames, Air Kerma Area Product (*KAP*) values, both for fluoroscopy and for cine angiography in Gy cm^2.

Figure 1. Kerma Area Product meter and EDD 30 UNFORS dosimeter

For skin dose equivalent estimation, the electronic EDD 30 dosimeter and Harshaw TLD 100 LiF dosimeters were used.

In the last 5 years, the number of angiography examinations, performed in the above mentioned Institute, increased by 70.2 % and the number of endovascular interventions by 464 %, and in the year 2009 it represented 4500 endovascular interventions and 3500 cardiac angiographic and angioplasty procedures.

The selection of monitored procedures was based on 2 main criteria, *i.e.*: high frequencies of the procedures and high *KAP* values [2].

The analyses of patient's radiation exposure was realized on 64 DSA procedures (of carotids, renal arteries and lower limbs) and on 244 patients undergoing cardiology interventions (coronary angiography, PTCA, radiofrequency ablation and cardiac electrophysiology studies). In the monitored group of patients were 104 women (32.7 %) and 214 men (67.3 %). Patients in the age above 40 years covered 82.4 %. The average age of all patients was 56 years.

Figure 2. Age distribution of monitored patients [3]

RESULTS

The results obtained in this study have covered a wide range of the cumulated entrance surface doses. The measured fluoroscopy time changed in the range from 0.3 min to 28.5 min during endovascular examinations and in the range from 0.8 min to 155 min during the cardiology examinations. The mean number of acquisitions performed during one procedure was 96 by endovascular procedures and 1123 by cardiac procedures. The cumulated entrance surface doses ranged by endovascular interventions between 71 mGy to 2361 mGy and by cardiac interventions from 12 mGy to 7445 mGy. The measured results of the fluoroscopy time, *KAP*, total number of frames and *ESD* in this study, were compared with other published data. As an example Figure 3 shows good agreement of monitored *KAP* values for CA and PTCA procedures with other studies [4].

Table 1: Survey of measured parameters of selected interventional procedures

	Interventional procedures				
	DSA carotids	**CA**	**PTCA**	**EFV**	**RFA**
No. of patients	**26**	**50**	**20**	**54**	**98**
Fluoroscopy time	**min**	**min**	**min**	**min**	**min**
- average	5.6 ± 0.8	2.7 ± 0.4	11.2 ± 1.9	7.0 ± 0.5	44.6 ± 3.5
- median	5.2 ± 0.9	1.8 ± 0.4	7.7 ± 1.9	3.5 ± 0.5	35.5 ± 3.5
- 3rd quartile	9.64	2.24	17.65	9.13	64.25
Cumulated *KAP*	**Gy·cm^2**	**Gy·cm^2**	**Gy·cm^2**	**Gy·cm^2**	**Gy·cm^2**
- average	49.2 ± 7.4	23.4 ± 2.0	55.8 ± 7.8	14.4 ± 2.3	92.5 ± 10.1
- median	36.2 ± 7.4	21.8 ± 2.0	52.6 ± 7.8	7.7 ± 2.3	62.4 ± 10.1
- 3rd quartile	59.87	27.09	76.98	16.04	132.22
Cumulated *ESD*	**mGy**	**mGy**	**mGy**	**mGy**	**mGy**
- average	231 ± 30	343 ± 30	942 ± 115	156 ± 24	971 ± 105
- median	181 ± 31	319 ± 28	741 ± 124	86 ± 26	655 ± 112
- 3rd quartile	281	396	1288	204.5	1388.3

Figure 3. Comparison of cumulated *KAP* values of this study with data given in the literature for PTCA and coronary angiography (CA)

CONCLUSION

On the basis of the obtained results we can make the following conclusions:

- The analyses of the measured results show that the main contribution to the patient's exposure is caused by acquisition in the DSA mode.
- Implementation of optimization methods – reduction of pulse frequency in fluoroscopy mode, as well as reduction of total number of frames, allowed significant decrease of patient's radiation doses.
- Comparison of the measured results of the fluoroscopy time, KAP, total number of frames and ESD in this study with other published data show good agreement of all monitored parameters.

REFERENCES

[1] Padovani R, Trianni A, Bokou C, Bosmans H, Jankowski J, Kottou S, Kepler K, Malone J, Tsapaki V, Salat D, Vano E, Vassileva J. Survey on performance assessment of cardiac angiography systems. Radiat Prot Dosim 2008;129:108-111.

[2] Vano E, Järvinen H, Kosunen A, Bly R, Malone J, Dowling A, Larkin A, Padovani R, Bosmans H, Dragusin O, Jaschke W, Torbica P, Back C, Schreiner A, Bokou C, Kottou S, Tsapaki V, Jankowski J, Papierz S, Domienik J, Werduch A, Nikodemova D, Salat D, Kepler K, Bor MD, Vassileva J, Borisova R, Pellet S, Corbett RH. Patient dose in interventional radiology: a European survey. Radiat Prot Dosim 2008;129:1-7.

[3] Böhm K, Nikodemová D, Šalát D, Drábová D: Management of Patient and Staff Doses in Interventional Radiology. XXVII. Days of Radiation Protection, Liptovský Ján 2005, Conference Proceedings, ISBN 80-88806-53- 4,16-19.

[4] Nikodemová D, Böhm K, Šalát D, Horváthová M, Príkazská M, Drábová D: Preliminary Results of Quality Assurance Implementatioan in Angiography and Interventional Cardiology. Proceedings of 14th International. Conference of Medical Physics (ICMP 2005), September 2005, Norimberg, Vol. 1, ISSN 0939-4990, 675-679.

UTJECAJ LJUDSKOG ČIMBENIKA U ZAŠTITI OD ZRAČENJA PRI SNIMANJU DIŠNIH PUTEVA DJECE

Natko Beck[1], Željka Knežević[2], Đurđica Milković[3], Saveta Miljanić[2] i Maria Ranogajec-Komor[2]
[1]Klinička bolnica "Sveti Duh", Zagreb
[2]Institut Ruđer Bošković, Zagreb
[3]Dječja bolnica Srebrnjak, Zagreb
natko.beck@gmail.com

UVOD

Tijekom liječničke obrade bolesti dišnih puteva djece, rentgenska snimka srca i pluća čini važan dio dijagnostičkog postupka. Pri pravilnoj indikaciji analiza intratorakalnog statusa daje kliničaru važne podatke na temelju kojih se postavlja ispravna dijagnoza i započinje liječenje.

Pošto se za dobivanje snimke koriste rentgenske zrake valja imati na umu i potencijalnu štetnost prilikom pretrage i u tom smislu zadovoljiti sve postulate zaštite djece od zračenja [1-3]. Inženjeri medicinske radiologije brinu se o većini parametara zaštite od zračenja, pošto su sami najviše uključeni u sam postupak, od održavanja rentgen uređaja, postavljanja djece u pravilan položaj, zaštitu olovnim pregačama i odabira pravilne ekspozicije za dobivanje kvalitetne snimke [4-6].

Cilj našeg rada bio je istražiti utjecaj ljudskog faktora, dakle inženjera medicinske radiologije, na primljenu dozu zračenja u dječjoj torakalnoj dijagnostici u Dječjoj bolnici Srebrnjak. Istraživanje je dio dugogodišnjeg projekta zaštite djece od zračenja. Doze zračenja mjerene su termoluminescentnim (TL) i radiofotoluminescentnim (RPL) dozimetrijskim sustavima [7]. Parametre ekspozicije inženjeri odabiru najviše prema iskustvu, te je od iznimne važnosti da se provodi kontrola njihovog rada u smislu unutarnje kontrole kvalitete s ciljem zaštite djece od prekomjernog zračenja, ali naravno i zbog same kvalitete obrade.

MATERIJALI I METODE

Ispitan je rad 3 inženjera medicinske radiologije (A, B i C) različitog iskustva u području dječje radiologije. Bilježili su se parametri tijekom snimanja, koje su inženjeri odabirali u svakodnevnom radu tijekom snimanja srca i pluća. Svaki inženjer imao je uvjete rada prema svom

izboru, prema svojoj edukaciji i iskustvu. Uvjeti snimanja na rentgenskom uređaju bili su u opsegu 95 – 105 kV, 1,6 – 3,6 mAs i udaljenosti 150 cm. Ispitivanje se izvodilo na uređaju Shimadzu 150 kV CH-200M. Svaki od inženjera je imao po 20 pacijenata. Pacijenti su bili između 6 i 16 godina, visine u opsegu 112 – 183 cm i težine 18 – 77 kg. Roditelji pacijenata potpisali su pristanak, koji je prethodno odobren od etičkog povjerenstva bolnice. U svih 60 pacijenata sustavno su mjerene površinske kožne doze zračenja u primarnom snopu na leđima. Doze su mjerene TL i RPL dozimetrima (Tablica 1). Obje vrste dozimetara prethodno su kalibrirane standardnim postupcima. Postavljanje samih dozimetara nije utjecalo na kvalitetu učinjene snimke, točnije na postavljanje radiološke dijagnoze.

Tablica 1. Parametri dozimetrijskog sustava

Dozimetrijski sustav	**RPL**	**TLD**	
	(Dose Ace)	GR-200A	TLD-100H
Čitač	FGD–1000	Toledo 654	Toledo 654
Detektor			
Materijal	s Ag aktivirano fosfatno staklo	LiF:Mg,Cu,P	LiF:Mg,Cu,P
Podrijetlo	Japan	Kina	SAD
Regeneriranje			
Temperatura (°C)	400	240	240
Vrijeme (min)	20	10	10
Predgrijavanje			
Temperatura (°C)	70	100	100
Vrijeme (min)	30	20	20
Očitavanje	UV ekscitacija		
Temperatura (°C)		220	220
Vrijeme (s)		30	30

REZULTATI

Rezultati dozimetrije pokazali su dobro slaganje između izmjerene doze i indeksa tjelesne mase (ITM) kod 2 inženjera medicinske radiologije (prosjek doza: 0,12 – 0,19 mSv). Veće su doze (0,33 – 0,39 mSv) dobivene nakon pregleda bolesnika koje je provodio treći inženjer medicinske radiologije (Slika 1). Zbog ovakvog rezultata odlučili smo nastaviti s istraživanjem nakon upoznavanja inženjera s rezultatima. Nakon edukacije, konzultacije i dogovora o protokolu doze na 40 novih bolesnika pokazale su smanjenje doze. Doze su bile u opsegu 0,13 – 0,18 mSv za sve pacijente, neovisno koji je od tri inženjera medicinske radiologije izvršio pregled (Slika 2).

Slika 1. Odnos doze i ITM (BMI)

Slika 2. Odnos doze i ITM (BMI) nakon edukacije

ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju pokazano je u kojoj mjeri ljudski faktor utječe na doze zračenja osoblja prilikom snimanja rtg snimke srca i pluća u djece. U smislu poboljšanja kvalitete i same zaštite djece od zračenja bitno je provoditi kontinuiranu edukaciju cjelokupnog osoblja. Pravilno educirani inženjeri medicinske radiologije značajno svojim ispravnim radom pridonose zaštiti od zračenja. U nastavku projekta istraživat će se rad djelatnika u rentgenskoj dijagnostici pri snimanju paranazalnih sinusa.

LITERATURA

[1] Milković Đ, Garaj-Vrhovac V, Ranogajec Komor M, Miljanić S, Gajski G, Knežević Ž, Beck N. Primary DNA damage assessed with the comet assay and comparison to the absorbed dose of diagnostic X-rays in children. Int J Toxicol 2009;28:405-416.

[2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report II. – Effects. Vienna, pp. 15, 2000.

[3] Seidenbusch MC, Schneider K. Radiation exposure of children in pediatric radiology. Rofo 2008;180(5):410-422.

[4] Cook JV, Kyriou JC, Pettet A, Fitzgerald MC, Shah K, Pablot SM. Key factors in the optimization of paediatric X-ray practice. Br J Radiol 2001;74(887):1032-1040.

[5] Simpson AK, Whang PG, Jonisch A Haims A, Grauer JN. The radiation exposure associated with cervical and lumbar spine radiographs. J Spinal Disord Tech 2008;21(6):409-412.

[6] Alt CD, Engelmann D, Schenk JP, Troeger J. Quality control of thoracic X–rays in children in diagnostic centers with and without pediatric–radiologic competence. Rofo 2006;178(2):191-199.

[7] Miljanić S, Ranogajec-Komor M, Knežević Ž, Vekić B. Main dosimetric characteristics of some tissue-equivalent TL detectors. Radiat Prot Dosim 2002;100(1-4):437- 442.

THE ROLE OF HUMAN FACTOR IN RADIATION PROTECTION OF CHILDREN DURING CHEST X RAY EXAMINATION

Natko Beck[1], Željka Knežević[2], Đurđica Milković[3], Saveta Miljanić[2] and Maria Ranogajec-Komor[2]
[1]Clinical Hospital "Sveti Duh", Zagreb, Croatia
[2]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
[3]Children Hospital Srebrnjak, Zagreb, Croatia
natko.beck@gmail.com

Radiation protection depends on many factors. Our study deals with the human factor, the radiology technicians' routine work. If all technical malfunctions are excluded they are responsible for the patient dose. Depending on their education and experience, technicians perform X ray examinations with various end results: image quality, entrance surface dose, patient interaction etc. In hospital setting we have consecutively chosen the study group of 20 children that had a clinical indication for a chest X ray examination (standard PA radiogram), for each of three technicians working at the radiology ward. A Shimadzu X ray machine was used in all cases. 60 children were from 6 to 12 years old and all parents were informed about the aim and the experimental details of the study. All of them gave their informed consent. Radiophotoluminescent (RPL) and thermoluminescent (TLD) dosimeters were applied at the entrance of the beam in the center of the X ray field to measure the entrance surface dose (ESD). Three differently experienced technicians were unaware of the objective of the study. Parameters that were noted were the kV, mAs and the size of the radiation field. The results show a good correlation in ESD between two technicians. Doses were significantly higher for the third one. After the results were known, protocols were designed and after educational interference, we continued to measure ESD again on a group of 40 children. The doses were reduced and there was a good correlation between all three technicians. With this work we want to clarify and show the importance of continuous education and good teamwork for dose reduction. In a sequel study, with the same three technicians, we hope to have results that would show a better dose reduction.

PRELIMINARNI REZULTATI NISKODOZNOG PROTOKOLA KOMPJUTORIZIRANE TOMOGRAFIJE PRSIŠTA KOD PACIJENATA S LIMFOPROLIFERATIVNIM BOLESTIMA

Jelena Popić Ramač[1], Željka Kneževič[2], Zoran Brnić[1], Branimir Klasić[1] i Andrija Hebrang[1]
[1]Klinički Zavod za dijagnostičku i intervencijsku radiologiju,
Klinička bolnica Merkur, Zagreb
[2]Institut Ruđer Bošković, Sekundarni standardni dozimetrijski laboratorij, Zagreb
jpopic@inet.hr

UVOD

Nakon otkrića X-zraka čovjek je podvrgnut udvostručenom ionizirajućem zračenju zahvaljujući najvećim dijelom zračenju iz medicinskih izvora. Ukupno 80 % zračenja dolazi iz prirodnih izvora, dok 15 % čini zračenje iz medicinskih izvora. Većinu tog zračenja čini zračenje u dijagnostičke svrhe. Smatra se da kompjutorizirana tomografija (CT) najviše doprinosi ukupnoj dozi zračenja iz medicinskih izvora. U Europi devedesetih godina 20.-tog stoljeća, CT je bio odgovoran za 40 % populacijske efektivne doze, makar je u ukupnom broju pretraga činio svega 7 % [1]. Danas CT čini oko 67 % zračenja iz medicinskih izvora ili 10 % ukupne doze zračenja [2]. Zbog raspršenog zračenja iz CT uređaja ozračeni su i drugi dijelovi tijela koji nisu u primarnom snopu.

Učinci zračenja su: karcinogeneza, leukemogeno, genetsko i teratogeno djelovanje [3]. Učestalo ponavljanje CT pretrage povećava rizik razvoja zračenjem izazvanog raka pluća [4]. CT prsišta povećava rizik za razvoj raka dojke u mladih žena za oko 14 % [5]. Broj pretraga prsišta sve je veći zbog prikaza plućnih embolija i prikaza srca. U populaciji mlađe i srednje dobi ukupni je rizik puno veći po jediničnoj vrijednosti doze zračenja zbog znatno veće osjetljivosti nezrelih organa i tkiva [6,7]. Usprkos visokim dozama zračenja CT ostaje nezamjenjiva metoda praćenja populacije bolesnika s limfoproliferativnim bolestima [8,9]. Zahvaljujući učinkovitoj terapiji, što uključuje ponavljanje CT pretraga, životni vijek ovih pacijenata izjednačava se s onim zdrave populacije. Sve veći broj ovih pacijenata sudjeluje u prokreaciji [10]. Česta ponavljanja povećavaju mogućnost stohastičkih oštećenja. Sniženje doze moglo bi značajno smanjiti sve navedene rizike. Ovo

je prvo takvo istraživanje, a moglo bi doprinijeti uvođenju drugačijih, "poštednih pretraga" i smanjenju ionako visokih doza, naročito za mladu populaciju.

PACIJENTI I METODE

Istraživanje je provedeno na populaciji od 50 pacijenata, koji se liječe u Kliničkoj bolnici Merkur, a boluju od limfoproliferativne bolesti. Preliminarni rezultati prikupljeni su za ukupno 13 pacijenata. Uvjet uključenja pacijenata u istraživanje bio je da je postavljena sumnja ili je već dokazano da u sklopu svoje bolesti imaju uvećanje limfnih čvorova u medijastinumu. Pretraga nije zatražena izvan redovnog protokola. Metoda istraživanja bila je usporedba doza i kvalitete snimki dobivenih snimanjem standardnim i niskodoznim protokolom. Za sve pacijente zabilježeni su: visina, težina, BMI, električni uvjeti i tip limfoproliferativne bolesti od koje boluju. Nakon toga učinjeno je prvo snimanje prsišta kompjutoriziranom tomografijom standardnim protokolom. Za 3 – 12 mjeseci (ovisno o tipu bolesti i kliničkim zahtjevima) učinjeno je kontrolno snimanje niskodoznim protokolom. Kod svakog snimanja učinjena je dozimetrija TLD dozimetrima. Doze dobivene standardnim i niskodoznim protokolom uspoređene su kod istog pacijenta. U radu je korišten spiralni uređaj za kompjutoriziranu tomografiju Shimadzu SCT 7800 TX. Prema preporukama EUR 16262 EN ispitivani volumen bio je od plućnih vrškova do baze pluća, prema učinjenom topogramu (120 kV i 160 mAs). Snimanje je učinjeno nakon davanja 50 mL vodotopivog kontrastnog sredstva (Xenetix). Debljina sloja je bila 7 mm, u spiralnom načinu snimanja. Korišten je "pitch" faktor 1. Dozimetrija je rađena na Institutu Ruđer Bošković u Zagrebu. Doze su mjerene termoluminiscentnim dozimetrima (TLD). Mjerene su kod svakog ispitanika na lokacijama radiosenzitivnih organa i tkiva u snopu ili blizu njega i to na sljedećim mjestima: leća oka, štitnjača, dojke, gonade. Pozicije postavljanja dozimetra su bile: korijen nosa, štitnjača, ksifoid, obje gonade (jajnici kod žena; testisi kod muškaraca). Za mjerenje doza na pacijentima korišteni su dobro poznati LiF:Mg,Ti termoluminiscentni dozimetri komercijalnog naziva TLD-100. TLD-100 dozimetri su približno tkivu ekvivalentni [11]. Dozimetri su mjerili ulaznu površinsku dozu (engl. *entrance surface doses*). U svakom krugu mjerenja uz dozimetre koji su korišteni za mjerenja doza na pacijentima korišteni su kalibracijski i kontrolni dozimetri. Dozimetri su zračeni na izvoru ^{137}Cs u Sekundarnom Standardnom Dozimetrijskom Laboratoriju u Institutu Ruđer Bošković. Kalibracijska doza bila je 5 mGy izražena kao ″kerma u zraku″ [12,13]. U ovom radu za očitavanje dozimetara korišten je čitač tipa "TOLEDO 654" (Pitman, Engleska).

Maksimalna temperatura očitavanja iznosila je 270 °C s brzinom grijanja od 10°C/s. Očitavanjem dozimetara dobiva se krivulja isijavanja. Maksimum krivulje isijavanja i površina ispod krivulje proporcionalni su količini svjetlosti koja se oslobodi tijekom očitavanja, tj. intenzitetu TL signala koji je linearno proporcionalan apsorbiranoj dozi. Nakon očitavanja dozimetara slijedi matematička obrada mjerenih podataka dobivenih ovisno o visini krivulje isijavanja ili površini ispod maksimuma. Podaci su obrađeni statističkim programom koji je dio programa TEMES na kojem je moguće praćenje mjerenja s TLD čitača te obrada podataka s grafičkim i numeričkim prikazom rezultata.

Kako bi objektivizirali kvalitetu snimki kompjutorizirane tomografije od svibnja 1999. godine u upotrebi su smjernice "*European guidelines on quality criteria for computed tomography*", poznatije kao EUR 16262 EN [14]. Kao kriteriji ocjene kvalitete snimki postavljeni su dijagnostički zahtjevi. Snimke su procjenjivala dva neovisna radiologa: radiolog 1 s više od 30 godina specijalističkog iskustva i radiolog 2, s 5 godina specijalističkog iskustva. Prikazani su rezultati ocjene kvalitete jednog radiologa. Ocjenjivani su sljedeći kriteriji snimki: razlučivost i kritična reprodukcija.

REZULTATI

Prema preliminarnim rezultatima dozimetrije (Tablica 1) snimanje protokolom B (niskodoznim) pokazuje znatno niže doze izmjerene na svim lokacijama u usporedbi sa snimanjem protokolom A (standardnim). Doze su niže: za faktor 3 – 6,4 na leći oka, za faktor 1,9 – 7,7 na štitnjači, za faktor 2,8 – 6,6 na sternumu, za faktor 1,4 – 8,5 na gonadama.

Tablica 1. Rezultati dozimetrije

Doza (mGy)												
Pacijent	Broj slojeva		Leća oka		Štitnjača		Sternum		Gonade d		Gonade l	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	38	39	0,74	0,18	12,0	6,25	23,52	6,84	0,48	0,20	0,30	0,21
2	38	40	0,47	0,14	13,24	6,05	13,79	6,37	0,23	0,12	0,28	0,11
3	44	40	0,77	0,14	20,30	3,89	18,0	6,48	0,23	0,09	0,22	0,14
4	39	38	1,60	0,10	21,34	3,41	21,68	6,20	0,86	0,12	1,05	0,11
5	34	38	0,74	0,16	25,55	6,54	25,54	6,83	0,38	0,16	0,37	0,15
6	25	38	0,63	0,13	18,50	3,38	23,45	3,57	0,58	0,08	0,38	0,09
7	38	39	0,57	0,18	19,54	3,32	20,62	6,54	0,38	0,16	0,32	0,16
8	36	39	0,65	0,16	8,5	4,16	21,36	5,69	0,19	0,13	0,18	0,15
9	36	35	0,55	0,18	5,57	2,98	22,15	6,11	0,19	0,13	0,18	0,14
10	41	41	0,83	0,13	26,75	3,48	26,04	6,19	0,47	0,20	0,43	0,16
11	36	36	0,73	0,15	21,0	5,23	25,74	6,46	0,31	0,16	0,29	0,16
12	30	30	1,00	0,33	22,26	6,15	23,39	6,25	0,28	0,18	0,25	0,13
13	35	33	0,87	0,24	16,43	5,43	22,49	6,39	0,32	0,18	0,36	0,16

Kvaliteta prikaza kod niskodoznog protokola je zadovoljavajuća za kriterije razlučivosti (Tablica 2) prema EUR 16262. Kvaliteta je nepromijenjena za razlučivost: A.2. cijele torakalne aorte i gornje šuplje vene, A.3. cijelog srca i A.5. žilnih struktura s *i.v.* kontrastom. Diskretno niža razlučivost nađena je za kriterij A.1. cijeli torakalni zid. Niža razlučivost kod 4 pacijenta nađena je za kriterij A.4. cijeli plućni parenhim.

Tablica 2. Ocjena razlučivosti

	A.1.		**A.2.**		**A.3.**	
PACIJENT	DA	NE	DA	NE	DA	NE
1	×		×		×	
2	×		×		×	
3	×		×		×	
4	×		×		×	
5		×	×		×	
6	×		×		×	
7	×		×		×	
8	×		×		×	
9	×		×		×	
10		×	×		×	
11	×		×		×	
12	×		×		×	

A.1. cijelog torakalnog zida, A.2. cijele torakalne aorte i gornje šuplje vene, A.3. cijelog srca

Kvaliteta prikaza prema kriterijima kritične reprodukcije također je zadovoljavajuća (Tablica 3). Očekivano razlike su u parametrima: B11. oštro razlučivoj reprodukciji segmentalnih bronha i B12. plućnog parenhima. Tek diskretne razlike su kod parametra B8. oštro razlučive reprodukcije jednjaka.

Tablica 3. Ocjena kritične reprodukcije

	B.1.		**B.2.**		**B.3.**		**B.4.**		**B.5.**		**B.6.**		**B.7.**		**B.8.**	
PACIJENT	DA	NE	DA	NE	DA	NE	DA	NE	DA	NE	DA	NE	DA	NE	DA	NE
1	×		×		×		×		×		×		×		×	
2	×		×		×		×		×		×		×		×	
3	×		×		×		×		×		×		×		×	
4	×		×		×		×		×		×		×		×	
5	×		×		×		×		×		×		×		×	×
6	×		×		×		×		×		×		×		×	
7	×		×		×		×		×		×		×		×	
8	×		×		×		×		×		×		×		×	
9	×		×		×		×		×		×		×		×	
10	×		×		×		×		×		×		×			×
11	×		×		×		×		×		×		×		×	
12	×		×		×		×		×		×		×		×	

Oštro razlučiva reprodukcija: B.1. torakalne aorte, B.2. struktura prednjeg medijastinuma i rezidue timusa (ukoliko je prisutna), B.3. dušnika i glavnih bronha, B.4. paratrahealnog tkiva, B.5. karine i limfnih čvorova $\geq$ 2 cm, B.6. limfnih čvorova 1 - 2 cm, B.7. limfnih čvorova 0,5 - 1 cm, B.8. jednjaka

ZAKLJUČAK

Korištenje niskodoznih protokola za CT prsišta vodi do smanjenja doza: za faktor 3 – 6,4 na leći oka, za faktor 1,9 – 7,7 na štitnjači, za faktor 2,8 – 6,6 na sternumu te za faktor 1,4 – 8,5 na gonadama**.** Kvaliteta prikaza slika kod niskodoznog protokola je zadovoljavajuća prema procijeni dva neovisna radiologa. Trebalo bi stoga razmotriti uvođenje niskodoznog protokola CT prsišta kao standardne tehnike snimanja kod ovih pacijenata.

LITERATURA

[1] Kalender WA, Schmidt BA, Zankl M, Schmidt M. A PC program for estimating organ dose and effective dose values in computed tomography. Eur Rad 1999;9:555-562.

[2] U.S. exposure to medical radiation soars, ACR issues new white paper on dosage. Diag Imag Intell Rep. June 2007 http://www.g2reports.com/issues/DIIR/2007_6/1612608-1.html

[3] Pierce DA, Preston DL. Radiation – related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. Radiat Res 2000;154:178-186.

[4] Brenner DJ, Elliston CD. Estimated radiation risks potentially associated with full-body CT screening. Radiology 2004;232:735-738.

[5] Hurwitz LM, Yoshizumi TT, Reiman RE, Paulson EK, Frush DP, Nguyen GT, Toncheva GI, Goodman PC. Radiation dose to the female breast from 16-MDCT body protocols. AJR Am J Roentgenol 2006; 186:1718-1722.

[6] Khursheed A, Hillir MC, Shrimpton PC, Wall BF. Influence of patient age on normalized effective doses calculated for CT examinations. Br J Radiol 2002;75: 819-830.

[7] Hall EJ. Lessons we have learned from our children: Cancer risks from diagnostic radiology. Pediatr Radiol 2002;32:700-706.

[8] Vock P, Soucek M, Daepp M, Kalender WA. Lung: spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continous transport, and scanner rotation. Radiology 1990;176:864-867.

[9] Clemons M, Loijens L, Gross P. Breast cancer risk following irradiation for Hodgkin`s disease. Cancer Treat Rev 2000;26:291-302.

[10] Nadich DP, Marhall CH, Gribbin C, Arams RS, Mc Cauley DI. Low-dose CT of the lungs: preliminary observations. Radiology 1990; 175:729-731.

[11] Knežević Ž, Krpan K, Ranogajec-Komor M, Miljanić S, Vekić B, Rupnik Z. Povezivanje termoluminescentnog čitača s računalom te razvoj programa za obradu mjernih podataka, U: Garaj-Vrhovac V, Kopjar N, Miljanić S, ur. Zbornik radova Šestog simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja, 18-20. travnja 2005; Zagreb, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2005. str.111-116.

[12] UNSCEAR 2000 Medical Radiation Exposures (2006) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly: available at: http://cnts.wpi.edu/RSH/Docs/UN-Chernobyl/inex.html

[13] Knežević Ž. Karakterizacija termoluminescentnih dozimetara u poljima fotonskog zračenja različitih energija, 2004, Magistarski rad, PMF, Sveučilište u Zagrebu.

[14] European guidelines on quality criteria for computed tomography, EUR 16262 EN, May 1999.

EFFICACY OF LOW-DOSE CT PROTOCOL IN FOLLOW-UP OF LYMPHOPROLIFERATIVE DISORDERS – PRELIMINARY RESULTS

Jelena Popić Ramač[1], Željka Knežević[2], Zoran Brnić[1], Branimir Klasić[1] and Andrija Hebrang[1]
[1]Department of Diagnostic and Interventional Radiology, Clinical Hospital Merkur, Zagreb, Croatia
[2]Ruđer Bošković Institute, Secondary Standard Dosimetric Laboratory, Zagreb, Croatia
jpopic@inet.hr

Most medically-related radiation is caused by diagnostic examinations, in particular by computed tomography (CT). The purpose of this research is to reduce radiation doses faced by the population frequently exposed to such procedures-those with lymphoproliferative disorders.

The research was conducted comparing radiation-exposition doses received by the radiosensitive organs (thyroid, lens, breast and gonad) using the standard thoracic CT protocol with the radiation received using the low-dose protocol, while maintaining display quality. The standard-dose thoracic protocol implies 120 kV and 150 mAs. The low-dose protocol was conducted on the same device using 120 kV and 30 mAs.

We confirmed the hypothesis that the use of the low-dose thoracic CT protocol leads to a reduction in radiation dose without compromising display quality. It is further expected that a reduction in doses will reduce the risk of radiation-related mutations.

NUSPOJAVE ADJUVANTNOG ZRAČENJA BOLESNIKA SA SEMINOMOM TESTISA STADIJA I

Marija Gamulin i Mislav Grgić
Klinički bolnički centar Zagreb, Klinika za onkologiju, Zagreb
marija.gamulin@zg.t-com.hr

UVOD

Tumori testisa su relativno rijetki s pojavnošću od 1 % svih tumora kod muškaraca [1]. Seminom testisa je najčešći testikularni tumor kod mlađih muškaraca u dobi od 25 do 35 godina života. Adjuvantno zračenje paraaortalnih limfnih čvorova nakon orhidektomije je jedan od 3 moguća načina liječenja. Izlječenje ovih bolesnika s adjuvantnom radioterapijom je 95 – 100 % [2,3]. Ocjena uspješnosti terapije se međutim mora zasnivati i na kvaliteti života kako za vrijeme tako i nakon terapije zračenja, pa je stoga razumljiva važnost pravovremene prevencije, odnosno tretiranja nastalih nuspojava koje mogu biti rane i kasne.

Cilj ovog istraživanja je procjena nuspojava tijekom i nakon radioterapije (RT) bolesnika oboljelih od seminoma testisa stadija I u svrhu preveniranja i liječenja istih.

MATERIJAL I METODE

Za praćenje nuspojava zračenja korišten je upitnik Europske organizacije za istraživanje i liječenje raka QLQ-C30 [4], te preporuka za ocjenu toksičnosti međunarodne Grupe radioterapijskih onkologa (RTOG), [5], a manji dio podataka preuzet je iz standardne rutinske medicinske dokumentacije. Bolesnici su ispunjavali upitnik nakon zračenja. Medijan duljine studije je 28 mjeseci (13 – 84 mjeseci).

U studiji je sudjelovalo 115 bolesnika sa seminomom testisa stadija I koji su liječeni adjuvantnom RT u Kliničkom bolničkom centru Zagreb, Klinika za onkologiju. Srednja dob bolesnika pri dijagnozi je 34 godina (19 – 72 godine). Sociodemografske osobitosti bolesnika prikazane su u Tablici 1. Svi bolesnici su liječeni adjuvantnom RT na područje paraaortalnih limfnih čvorova fotonima linearnog akceleratora, energije 15 MV pomoću 2 nasuprotna anteroposteriorna polja s tumorskom dozom od 24 Gy u 16 dnevnih frakcija.

Tablica 1. Sociodemografske karakteristike bolesnika

Broj ispitanika	115
Dob pri dijagnozi (g.)	34 (19 – 72)
Obrazovanje	
niže i srednje	82 (71 %)
visoko i više	33 (29 %)
Bračni status	
oženjeni	82 (71 %)
neoženjeni	28 (25 %)
u zajednici	5 (4 %)
Tumori u obitelji	
bez tumora	55 (48 %)
s tumorima	60 (52 %)

REZULTATI

Praćenje nuspojava tijekom i nakon RT je pokazalo da bolesnici imaju nuspojave iz područja probavnog sustava, umor i smanjenje kondicije, utjecaj na psihičke i kognitivne funkcije, te seksualne probleme. Nuspojave u vezi seksualnih problema dane su u Tablici 2, a ostale u Tablici 3.

Tablica 2. Utjecaj adjuvantne radioterapije na seksualni život bolesnika

Seks prije, za i nakon RT	**% bolesnika**
uredan seks prije, za i nakon radioterapije	37
nije imalo seks za vrijeme radioterapije	11
prije, za i nakon RT problemi: libido+erekcija+seks. nezadovoljstvo	25
za vrijeme radioterapije: seks. nezadovoljstvo+smanjen libido	18
nakon radioterapije bolji seks	6
nakon radioterapije lošiji seks	3

Ukupno 4 % bolesnika je zahtijevalo tijekom radioterapije liječenje nuspojava, dva bolesnika s antiemeticima, te dva bolesnika anksioliticima. Ukupno 6 % bolesnika je imalo nuspojave nakon radioterapije, 4 bolesnika nisu trebali terapiju dok su 3 bolesnika zahtijevala povremenu terapiju. Tijekom radioterapije jedan bolesnik je bio u pauzi od zračenja 3 dana jer je imao trombocitopeniju G1 prema RTOG [5].

Tablica 3. Nuspojave tijekom i nakon zračenja.

Nuspojave	**%**
mučnina	25
proljev	2
povraćanje	1
umor	4
mučnina i povraćanje	15
mučnina i tvrda stolica	8
mučnina i proljev	7
mučnina, povraćanje i proljev	4
mučnina i umor	27
bez nuspojava	7
ista tjelesna težina kao i prije zračenja bez anokreksije	46
anoreksija uz gubitak tjelesne težine ≤ 5%	28
anoreksija uz gubitak tjelesne težine ≤ 15%	23
povećanje tjelesne težine tijekom zračenja u odnosu na prije	3
problemi sa spavanjem	12
zabrinuto i nervozno	35
zabrinuto, nervozno depresivno	32
problemi s pamćenjem, koncentracijom	8
bez nuspojava sa spavanjem, zabrinutošću, nervozom i depresijom	13
bolovi u trbuhu	16
problemi s disanjem	4
financijski problemi zbog izostanka s posla	21
socijalni problemi u smislu izlazaka i druženja	23
Kondicija zadnji tjedan zračenja	
loša/vrlo loša	23
srednja	20
dobro/savršeno	57
Kvaliteta života zadnji tjedan zračenja	
loša/vrlo loša	14
srednja	20
dobro/savršeno	66

Povraćanje se javljalo prva 3 dana radioterapije, koje se kupiralo s tabletama ondansetron hidroklorida od 8 do 16 mg dnevno. Od anksiolitika su bolesnici uzimali uglavnom prvi tjedan radioterapije diazepam u dozi od 2 mg dnevno, a najviše 5 mg dnevno *per os*.

Po završenoj radioterapiji 94 % bolesnika nije imalo nuspojave, a kod 6 % bolesnika zabilježene su nuspojave. Povremene nuspojave u vidu žgaravice, gastritisa ili bolova u želucu bolesnici su liječili uzimanjem preparata *Esomeprazole magnesium* 20 mg dnevno, a jedan je bolesnik imao povremene proljeve do 3 mjeseca nakon zračenja koji nisu zahtijevali terapiju. Godinu dana nakon završenog zračenja jedan je bolesnik u 2 navrata imao akutni pankreatitis koji je zahtijevao bolničko liječenje. U periodu od jedne do šest godina nakon radioterapije u dobi od 18 – 29 godine života 80 % bolesnika ima zdravu djecu, a u dobnoj skupini od 30 – 39 godina 67 %.

ZAKLJUČAK

Populacija muškaraca koji oboljevaju od seminoma testisa je mlađe životne dobi. Transparentnost u komunikaciji i individualni pristup bolesnicima dat će najbolje rezultate u lakšem savladavanju posljedica nastalih radioterapijom. Važan problem predstavlja promjena u spolnoj aktivnosti kako iz psiholoških razloga tako i zbog saznanja o poteškoćama sa fertilitetom. Prikazana studija daje značajni doprinos uvidu u opće stanje osoba nakon izloženosti ionizirajućem zračenju, mogućnostima fertiliteta, prepoznavanjem osnovnih grupa, popratnih pojava i osobnog pristupa bolesnika u snalaženju sa novom životnom situacijom u svrhu što bržeg prepoznavanja potrebnih postupaka za sanaciju istih i poboljšanje životnog standarda.

LITERATURA

[1] Adami HO, Bergström R, Möhner M, Zatoński W, Storm H, Ekbom A, Tretli S, Teppo L, Ziegler H, Rahu M, et al. Testicular cancer in nine northern European countries. Int J Cancer 1994;59:33-38.

[2] NATIONAL COMPREHENSIVE CANCER NETWORK 2011. Clinical Practice Guidelines in Oncology. Testicular Cancer - v.1. www.nccn.org

[3] Classen J, Schmidberger H, Meisner C, Winkler C, Dunst J, Souchon R, Weissbach L, Budach V, Alberti W, Bamberg M. German Testicular Cancer Study Group (GTCSG). Para-aortic irradiation for stage I testicular seminoma: results of a prospective study in 675 patients. A trial of the German testicular cancer study group (GTCSG). British J Cancer 2004;90:2306-2311.

[4] Aaronson NK, Ahmedzai S, Bergman B, Bullinger M, Cull A, Duez NJ, Filiberti A, Flechtner H, Fleishman SB, de Haes JC, et al. The European Organization for Research and Treatment of Cancer QLQ-C30: A Quality-of-Life Instrument for Use in International Clinical Trials in Oncology. J National Cancer Inst 1993;85(3):365-376.

[5] Cox JD, Joann Stetz BS, Pajak TF. Toxicity criteria of the Radiation Therapy Oncology Group (RTOG) and the European Organization for Research and Treatment of Cancer (EORTC). Int J Rad Oncol Biol Phys 1995;31(5):1341-1346.

SIDE EFFECTS OF ADJUVANT RADIOTHERAPY IN PATIENTS WITH TESTICULAR SEMINOMA STAGE I

Marija Gamulin and Mislav Grgić
Clinical Hospital Centre Zagreb, Departmant of Oncology, Zagreb, Croatia
marija.gamulin@zg.t-com.hr

In the present study the side effects of adjuvant radiotherapy of testicular seminoma stage I patients were followed up in the period between 13 to 84 months (median 28 months). The most frequent side effects in these patients during radiotherapy were gastrointestinal problems (nausea/vomiting), psychologic and cognitive problems and minor sexual problems. The reported side effects were treated by antimmimetics and anxiolytics. After radiotherapy, the side effects persisted in 6 % of patients but therapy was needed only in few. Healthy children were born to 76 % of patients in the age group 18 – 39 years after radiotherapy. The present study shows that adjuvant irradiation of paraaortal lymph nodes with total a dose of 24 Gy in 16 daily fractions in testicular seminoma patients causes acceptable side effects with acceptable quality of life and fertility, however in conditions of individual approach and family consulting.

INTERKOMPARACIJA DOZIMETARA ZA MJERENJE PERIFERNIH DOZA U RADIOTERAPIJI – AKTIVNOST RADNE GRUPE 9 EURADOS-a: ZAŠTITA OD ZRAČENJA U MEDICINI

Saveta Miljanić[1], Igor Bessieres[2], Jean-Marc Bordy[2], Emiliano D'Agostino[3], Francesco d'Errico[4], Angela di Fulvio[4], Carles Domingo[5], Željka Knežević[1], Pawel Olko[6], Marco Silari[7], Liliana Stolarczyk[6] i Roger Harrison[8]

[1]Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska
[2]Commissariat à l'Énergie Atomique, Pariz, Francuska
[3]Centre d'Etudes de l'Energie Nucléaire Studiecentrum voor Kernenergie, Mol, Belgija
[4]Università di Pisa, Pisa, Italija
[5]Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Španjolska
[6]Instytut Fizyki Jadrowej, Krakow, Poljska
[7]CERN, Geneva, Švicarska
[8]University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, UK
saveta@irb.hr

UVOD

Već duže je poznato da se kod pacijenata liječenih radioterapijom povećava rizik pojavljivanja sekundarnog malignog oboljenja što se povezuje s dozama koje pacijent primi izvan područja radijacijskog tretmana (periferne ili "*out of field*" doze). Danas se ranom detekcijom karcinoma i modernim tehnikama radioterapije produžuje životni vijek s jedne strane ali i povećava rizik sekundarnog oboljenja s druge strane. To je osobito vrijedno pažnje kod mladih pacijenata koji imaju pred sobom duži očekivani životni vijek.

EURADOS (*European Radiation Dosimetry Group*) je udruga čiji je cilj unaprijediti znanstveno razumijevanje i tehnički razvitak dozimetrije ionizirajućeg zračenja u područjima zaštite od zračenja, radiobiologije, radioterapije i medicinske dijagnostike stimulirajući suradnju između europskih laboratorija. Osnovana je 1981., a danas je čine 54 ustanove iz 24 zemlje kao redovni članovi i više od 200 pojedinaca kao pridruženi članovi [1]. EURADOS djeluje putem dvanaest radnih grupa koje se uglavnom formiraju prema dobivenim europskim projektima u okviru programa

Europske zajednice ili prema temama od šireg interesa pa se očekuje njihovo financiranje u budućim projektima.

Istraživanja Radne grupe 9 (WG 9) EURADOS-a: "Zaštita od zračenja u medicini" odnedavno su usmjerena na procjenu doza (i njihovu detaljnu raspodjelu) koje pacijent prima izvan područja radijacijskog tretmana i pratećeg rizika pojave sekundarnog oboljenja. Definirani su sljedeći zadaci:

- Identificirati kliničke situacije i protokole kod kojih volumeni izvan područja tretmana mogu primiti značajne doze
- Odabrati skup dozimetara pogodnih za mjerenja fotonskih i neutronskih doza i dogovoriti zajednički protokol mjerenja
- Kalibrirati dozimetre sudionika u referentnom snopu kliničkog LINAC-a (CEA Saclay)
- Obaviti dodatna dozimetrijska mjerenja u uvjetima bliskim kliničkim i kliničkim
- Simulirati mjerni postav Monte Carlo metodom radi daljnje analize mjernih rezultata
- Odabrati modele koji će se, počevši od mjerenja doza u organima, upotrijebiti za procjenu rizika štetnog utjecaja na zdravlje
- Rezultate mjerenja primijeniti na prethodno definirane teorijske modele i procijeniti rizik štetnog utjecaja na zdravlje (tj. rizik sekundarnog malignog oboljenja) za različita tkiva
- Suglasiti se o preporukama ograničavanja neželjenom izlaganju izvan ciljnog volumena i smanjenja štetnog utjecaja na zdravlje
- Preporuke za poboljšanje zaštite od zračenja pacijenata bit će oblikovane u protokol namijenjen svim zainteresiranim kliničkim centrima.

Radioterapija prostate identificiran je referentni primjer koji se treba analizirati.

Shema planiranog rada prikazana je na Slici 1.

Odabir i ispitivanje dozimetara koji su pogodni za fotonsku i neutronsku radioterapijsku dozimetriju bio je prvi znanstveni zadatak.

MATERIJAL I METODE

Osnova za procjenu svojstava dozimetara bilo je ozračivanje u referentnom kliničkom snopu LINAC-a u CEA LIST Saclay. Zračenja su obavljena u vodenom fantomu dimenzija $30 \times 30 \times 60$ cm^3. Dozimetri su zračeni u matrici mjernih točaka unutar fantoma. Doza od 2 Gy predana je u točki na centralnoj osi horizontalnog snopa na dubini od 10 cm u vodi uz

veličinu polja 10 × 10 cm^2 u toj dubini. Za mjerenja doze fotona ozračenja su bila kod tri kvalitete koje odgovaraju 6, 12 i 20 MV, što je dalo ukupno 204 mjerenja po tipu dozimetra. Neutronske doze mjerene su samo za energije 12 i 20 MV.

Referentna dozimetrija određena je standardnom ionizacijskom komorom mjerenjima u različitim dubinama u vodenom fantomu.

Slika 1. Shema planiranog rada radne grupe 9 EURADOS-a

U interkomparaciji su korišteni sljedeći dozimetri:

a) Za fotone: Radiofotoluminescentni (RPL) – Institut Ruđer Bošković (IRB), Zagreb, OSL dozimetri – Commissariat à l' Ėnergie Atomique (CEA), Paris, termoluminescentni (TLD) – Instytut Fizyki Jadrowej (IFJ), Krakow i IRB, Zagreb
b) Za neutrone: Detektori traga (CR39) – Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) i "Bubble" detektori – Università di Pisa (UP) i SCK–CEN, Mol.

Na Slici 2 prikazan je vodeni fantom ispunjen RPL dozimetrima u položaju za zračenje. Karakteristike RPL i TL dozimetara koje je koristio IRB (ujednačenost, reproducibilnost, prag detekcije, energijska ovisnost) ispitane su u ranijim radovima [2,3]. Korišteni su RPL dozimetri u obliku staklenih štapića, tip GD-352 M s ugrađenim Sn filterom u plastičnom držaču vanjskih dimenzija ϕ 4,3 mm $\times$ 14,5 mm. Korišteni su sljedeći TL detektori: TLD-100 (Harshaw): ^{nat}LiF:Mg,Ti (kod 6 MV) i TLD-700 (Harshaw): ^{7}LiF:Mg,Ti (kod 12 i 20 MV). Dimenzije detektora bile su: ϕ 4,5 mm $\times$ 0,9 mm.

Slika 2. Vodeni fantom s RPL dozimetrima

REZULTATI

Rezultati su pokazali da svi dozimetri korišteni za mjerenje fotonskih perifernih doza imaju zadovoljavajuća svojstva. Neutronske doze su u postupku evaluacije. Usporedba RPL i TL detektora koje je koristio Institut Ruđer Bošković dala je sljedeće rezultate:

- Kod mjerenja doza u terapijskom području (″target volume″) u poljima visoko energijskih fotona RPL dosimetri tipa GD–352M pokazuju više vrijednosti od referentnih – to više što su energije fotona više. To pripisujemo utjecaju Sn filtera.
- Prema podacima iz literature [4,5] tipovi GD–301 i GD–302M (bez Sn filtera) ne pokazuju energijsku ovisnost kod visokih energija i u budućim eksperimentima će se ti tipovi koristiti za mjerenje doze u terapijskom volumenu.

- RPL dozimetri pokazuju vrlo visoku ujednačenost i radi toga nema potrebe određivanja individualne osjetljivosti.
- Osnovno (engl. *background*) očitanje RPL dozimetara se može zanemariti i kod vrlo niskih doza.
- Oba tipa dozimetara (RPL i TL) pokazuju vrlo dobru reproducibilnost, prosječno oko 1,4 %.
- TL detektori pokazuju vrlo dobru energijsku ovisnost u cijelom području energijskih spektara kojima su bili izloženi u različitim dubinama u vodenom fantomu.
- Automatski čitač RPL detektora pokazao se pogodnim za mjerenje doza velikog broja detektora – osigurani su isti uvjeti očitavanja u grupi koja sadrži 20 uzoraka.

LITERATURA

[1] www.eurados.org

[2] Knežević Ž, Beck N, Milković Đ, Miljanić S, Ranogajec-Komor M. Characterization of RPL and TL dosimetry systems and comparison in medical dosimetry applications. Radiat Meas 2011 (u tisku).

[3] Miljanić S, Ranogajec-Komor M, Knežević Ž, Vekić B. Main dosimetric characteristics of some tissue-equivalent TL detectors. Radiat Prot Dosim 2002;100:437-442.

[4] Mizuno H, Kanai T, Kusano Y, Ko S, Ono M, Fukumura A, Abe K, Nishizawa K, Shimbo M, Sakata S, Ishikura S, Ikeda H. Feasibility study of glass dosimeter postal dosimetry audit of high–energy radiotherapy photon beams. Radiother Oncol 2008;86:258-263.

[5] Rah JE, Hwang UJ, Jeong H, Lee SY, Lee DH, Shin DH, Yoon M, Lee SB, Park SY. Clinical application of glass dosimeter for *in vivo* dose measurements of total body irradiation treatment technique. Radiat Meas 2011;46:40-45.

INTERCOMPARISON OF DOSIMETERS FOR NON-TARGET ORGAN DOSE MEASUREMENTS IN RADIOTHERAPY – ACTIVITY OF EURADOS WG 9: RADIATION PROTECTION IN MEDICINE

Saveta Miljanić[1], Igor Bessieres[2], Jean-Marc Bordy[2], Emiliano D'Agostino[3], Francesco d'Errico[4], Angela di Fulvio[4], Carles Domingo[5], Željka Knežević[1], Pawel Olko[6], Marco Silari[7], Liliana Stolarczyk[6] and Roger Harrison[8]

[1]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
[2]Commissariat à l'Énergie Atomique, Paris, France
[3]Centre d'Etudes de l'Energie NucléaireStudiecentrum voor Kernenergie, Mol, Belgium
[4]Università di Pisa, Pisa, Italy
[5]Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Spain
[6]Instytut Fizyki Jadrowej, Krakow, Poland
[7]CERN, Geneva, Switzerland
[8]University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, UK
saveta@irb.hr

It has been known for a long time that patients treated with ionizing radiation carry a risk of developing radiation induced cancer in their lifetimes. It is recognized that cure/survival rates in radiotherapy are increasing, but so are secondary cancers. These occurrences are amplified by the early detection of disease in younger patients. These patients are cured from the primary disease and have long life-expectancies, which increase their chances of developing secondary malignancies.

The motivation of the EURADOS Working Group 9 (WG 9) "Radiation protection dosimetry in medicine" is to assess undue non-target patient doses in radiotherapy and the related risks of secondary malignancy with the most accredited available methods and with the emphasis on a thorough evaluation of dosimetry methods for the measurements of doses remote from the target volume, in phantom experiments. The development of a unified and comprehensive dosimetry methodology for non-target dose estimation is the key element of the WG9 current work. The first scientific aim is to select and review dosimeters suitable for photon and neutron dosimetry in radiotherapy and to evaluate the characteristics of dosimeters at CEA LIST Saclay in reference clinical LINAC beam.

KALIBRACIJA OPTIČKI STIMULIRANIH LUMINISCENTNIH DOZIMETARA (OSL) ZA *IN-VIVO* DOZIMETRIJU U RADIOTERAPIJI

Iva Mrčela, Tomislav Bokulić, Mirjana Budanec, Željko Soldić, Ana Fröbe i Zvonko Kusić
Klinička bolnica "Sestre milosrdnice",
Klinika za onkologiju i nuklearnu medicinu, Zagreb
imrcela@kbsm.hr

UVOD

Optički stimulirani luminiscentni dozimetri (OSLD-i) već su duže vrijeme prisutni u raznim područjima dozimetrije, a sve više raste interes i za njihovom primjenom u medicini. Dosada su provedena istraživanja različitih OSL dozimetrijskih sustava za dozimetriju pacijenata u dijagnostičkoj radiologiji i vanjskoj radioterapiji. OSLD-i dolaze u dva osnovna oblika: kao pasivni detektori s odgođenim očitanjem doze [1,2] ili kao detektori temeljeni na tehnologiji optičkih vlakana kojima je moguće očitavanje doze u stvarnom vremenu [3]. Pasivni OSLD-i su vrlo slični termoluminiscentnim dozimetrima, razlikuju se u načinu očitanja, jer se stimulacija luminiscencije izaziva pomoću svjetlosti umjesto topline. Zanimljivo svojstvo ovih dozimetara je mogućnost ponovljenog očitavanja istog dozimetra obzirom da se prilikom stimulacije oslobađa samo manji dio naboja dok ostatak ostaje i dalje zarobljen u kristalnoj rešetci materijala.

U ovom radu istražili smo svojstva komercijalnog OSL dozimetrijskog sustava s dozimetrima od ugljikom dopiranog aluminij oksida (Al_2O_3:C) za *in-vivo* dozimetriju bolesnika u radioterapiji vanjskim snopovima ^{60}Co fotona. Dio rezultata nastao je u sklopu projekta s Međunarodnom agencijom za atomsku energiju (eng. *International Atomic Energy Agency*, IAEA) pod nazivom: "Development of procedures for *in-vivo* dosimetry in radiotherapy". Cilj projekta bio je usporediti različite vrste dozimetara za dozimetriju pacijenata u radioterapiji te predložiti smjernice za uvođenje novih dozimetara u kliničku *in-vivo* dozimetriju. Ovdje će biti predstavljena ispitivanja osnovnih svojstava dozimetrijskog sustava i usporedba dva načina kalibracije. Provjera kalibracijskih postupaka i prikladnost OSL sustava za kliničku *in-vivo* dozimetriju napravljena je mjerenjem ulazne doze na antropomorfnom Aldersonovom fantomu.

MATERIJAL I METODE

Radioterapijski ^{60}Co uređaj (Cirus, Cis BioInternational, Francuska) upotrijebljen je za ozračivanje dozimetara. Pri kalibraciji korištena je Farmerova ionizacijska komorica 0,6 cm^3 model 30002 i Unidos elektrometar (sve PTW, Freiburg, Njemačka) te pločasti fantom od bijelog polistirena (RW3, PTW). Vremena ozračivanja izračunata su računalnim sistemom za planiranje u radioterapiji (Theraplan Plus 1000, MDS Nordion, Kanada).

Ispitivan je dozimetrijski sustav InLight^{TM} (Landauer, USA) koji uključuje točkaste (engl. *dot*) dozimetre, microStar^{TM} čitač i pripadno računalo. Dozimetri se sastoje od aktivnog OSL elementa i plastičnog kućišta koje se može otvarati prilikom očitavanja u čitaču ili ručno radi poništavanja dozimetara. Aktivni element detektora ima oblik pločice promjera 7 mm i debljine 0,3 mm. Budući da detektor treba mjeriti dozu na dubini najveće doze, tijekom zračenja preko detektora postavljeni su tzv. "build up" poklopci od 2 mm aluminija. Izvor svjetlosti u microStar čitaču je niz dioda koje emitiraju zelenu svjetlost, valne duljine 530 nm.

Određena je ukupna reproducibilnost mjernog sustava, nepouzdanost očitanja pojedinog dozimetra i faktori osjetljivosti pojedinih dozimetara u odnosu na cijeli skup (eng. *batch*) dozimetara. Preko 200 dozimetara ozračeno je pod istim uvjetima: 50 cGy na površini fantoma uz udaljenost od 80 cm od izvora zračenja (eng. *source to skin distance SSD*). Isto je napravljeno s grupom od 20 OSLD-a koji su ozračeni sa 100 cGy. Svaki dozimetar očitan je pet puta iz čega je dobiveno srednje očitanje pojedinog dozimetra R_i i pripadajuća relativna standardna devijacija (SD). Nepouzdanost očitanja pojedinog dozimetra izražena je kao srednja vrijednost pojedinačnih relativnih SD. Reproducibilnost mjernog sustava dana je kao relativna SD svih R_i u odnosu na srednju vrijednost očitanja u cijelom skupu dozimetara. Faktori osjetljivosti dozimetara s_i određeni su prema izrazu:

$$s_i = \frac{nR_i}{\sum_i^n R_i} \qquad (1)$$

gdje je n ukupan broj dozimetara u skupu.

Dozimetri se mogu ponovno upotrebljavati na dva načina: poništavanjem doze prije ponovnog ozračivanja, ili bez poništavanja ali uz oduzimanje prethodnog očitanja. Za određivanje reproducibilnosti mjerenja

u ova dva načina upotrebe dvije skupine od tri OSLD-a bile su ozračene dozama zračenja od 100 cGy u osam ciklusa. Dozimetri u prvoj grupi su poništavani između dva ozračivanja dok su drugi nakupljali dozu. Reproducibilnost je izražena kao relativna SD općih aritmetičkih sredina [4] očitanja za pojedine cikluse zračenja.

Za provjeru linearnosti odziva OSLD-a na različitim dozama izdvojeno je 20 dozimetara koji su u parovima ozračeni s 20 do 600 cGy, na isti način kao i za prethodna mjerenja, uz istovremeno mjerenje s ionizacijskom komoricom na referentnoj dubini unutar fantoma. Poznato je supralinearno ponašanje OSLD-a na višim dozama koje se mora korigirati [1,2,5].

Uspoređena su dva načina kalibracije dozimetara. Protokol predložen u sklopu IAEA projekta preporučuje pojedinačnu kalibraciju svakog dozimetra na fiksnoj dozi dok se nelinearnost korigira korekcijskim faktorom. Dozimetri koji nisu prethodno izlagani zračenju, postavljeni su po dva na površinu fantoma. Veličina polja je bila 10×10 cm^2 na udaljenosti 80 cm, a vrijeme ozračivanja izračunato pomoću sistema za planiranje kako bi apsorbirana doza bila 50 cGy na dubini maksimalne doze $d_{\max} = 0{,}5$ cm. Ionizacijska komorica postavljena je unutar fantoma na referentnu dubinu od 5 cm. Kalibracijski faktor računa se prema:

$$F_{cal} = \frac{D_0}{R_0} \cdot \left(\frac{SSD - d_s}{SSD + d_{\max}} \right)^{-2} \qquad (2)$$

gdje je D_0 doza određena komoricom, R_0 usrednjeno očitanje OSLD-a, izraz u zagradi predstavlja korekciju za udaljenost dok je d_s udaljenost od površine fantoma do aktivnog elementa OSLD-a.

Korekcijski faktori za nelinearnost određeni su prema IAEA protokolu kao:

$$k_{lin} = \frac{R_{cal}}{D_{cal}} \cdot \frac{D_x}{R_x} \qquad (3)$$

Ovdje je indeksom „*cal*“ označeno očitanje OSLD-a (R) i komorice (D) za mjerenje doze koja odgovara dozi pri kalibraciji dok se "x" odnosi na ostale doze za koje je mjerenje izvršeno. Ulazna doza D_E određuje se kao umnožak OSLD očitanja kalibracijskog faktora F_{cal} i korekcijskih faktora [6].

Alternativno je napravljena kalibracija prema baždarnoj krivulji dobivenoj za izdvojeni set od 20 dozimetara ozračen različitim dozama koji je s cijelom skupinom OSLD-a povezan preko faktora osjetljivosti

definiranih izrazom (1). Dozimetri su optički poništeni i ozračeni dozama od 20 do 1000 cGy koje su istovremeno mjerene ionizacijskom komoricom. Omjer M usrednjenog očitanja R i pripadajućeg faktora osjetljivosti s predstavlja odziv OSLD-a na dozu neovisan o osjetljivosti pojedinog dozimetra. Odnos odziva M i doze D izmjerene komoricom dobiven je iz prilagodbe polinoma drugog stupnja na mjerene podatke.

$$M = a_0 + a_1 D + a_2 D^2 \tag{4}$$

Doza izmjerena OSLD-om D_{OSL} dobiva se kao pozitivno rješenje kvadratne jednadžbe (4) koja opisuje kalibracijsku krivulju:

$$D_{OSL} = \left(-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2\left(a_0 - M\right)}\right) / 2a_2 \tag{5}$$

Dva postupka kalibracije uspoređena su za mjerenja ulazne doze D_E na Aldersonovom fantomu za nekoliko različitih postavki polja zračenja pri čemu je određeno postotno odstupanje ulazne od očekivane doze, Δ [6].

REZULTATI

Nepouzdanost očitanja pojedinog dozimetra bila je 0,6 %, što je u skladu s objavljenim rezultatima [1]. Reproducibilnost sustava nije se pokazala bitno različita u dvije grupe: za 200 OSLD-a ozračenih s 50 cGy bila je 1,6 % a 1,8 % za 20 dozimetara ozračenih s 100 cGy. Pokazalo se da OSLD-i imaju bolju reproducibilnost kada se poništavaju prije ponovnog ozračivanja: 1,0 % u odnosu na 3,5 % u skupini koja nije poništavana. Relativne SD pojedinačnih faktora osjetljivosti bile su između 0,1 i 2,3 %, a vrijednosti svih faktora unutar ± 5 %.

Kalibracijom prema IAEA protokolu dobiveni su pojedinačni F_{cal} (Slika 1.a). Potvrđeno je supralinearno ponašanje OSLD-a s povećanjem doze te su prema (3) određeni korekcijski faktori za nelinearnost (Tablica 1).

Tablica 1. Korekcijski faktori za nelinearnost

D (cGy)	20	50	100	200	300	400	600
k_{lin}	1,02±0,05	1,00±0,02	0,99±0,02	0,96±0,02	0,95±0,02	0,94±0,02	0,91±0,02

Baždarna krivulja (Slika 1.b) dobivena je prilagodbom rezultata mjerenja na polinom drugog stupnja (4) s koeficijentima: a_0 = (-3,7 ± 1,9), a_1 = (1,150 ± 0,009) cGy^{-1} i a_2 = (6,5 ± 0,8)·10^{-5} cGy^{-2} pomoću kojih se računa nepoznata doza iz OSLD očitanja (5).

Iz mjerenja ulaznih doza na Aldersonovom fantomu za oba načina kalibracije (Tablica 2) vidi se da je apsolutna vrijednost odstupanja mjerene od očekivane doze manja kod primjene kalibracije preko baždarne krivulje. Dodatna prednost ovog pristupa je praktične prirode: faktori osjetljivosti mogu se mjeriti za veći broj dozimetara odjednom, bez ionizacijske komorice, dok se ona koristi samo na manjem podskupu koji se ozračuje različitim dozama.

a

b

Slika 2. a) Histogram kalibracijskih faktora određenih IAEA protokolom. Linijom je označena prilagodba na normalnu raspodjelu. *b)* Kalibracijska krivulja u ovisnosti o dozi. Puna linija predstavlja polinomnu prilagodbu drugog stupnja na eksperimentalne podatke dok je crtkano prikazana idealna linearna ovisnost.

Tablica 2. Rezultati mjerenja na Aldersonovom fantomu. N je ukupan broj izmjerenih ulaznih doza. Izražene su srednja postotna vrijednost odstupanja mjerene od očekivane doze i relativna SD.

N=16	Srednja Δ %	SD %
Kalibracija 1 (F_{cal} & k_{lin})	1,2	1,0
Kalibracija 2 ($M = a_0 + a_1 D + a_2 D^2$)	-0,4	1,0

ZAKLJUČAK

OSL dozimetrijski sustav pokazao se dobrim izborom za in-vivo dozimetriju u radioterapiji uz zadovoljavajuće rezultate u ponovljenim mjerenjima i provjeri postupka na antropomorfnom fantomu. Nešto bolji rezultati odstupanja mjerene ulazne od očekivane doze dobiveni su kalibracijom iz baždarne krivulje ovisne o isporučenoj dozi, uz dodatnu prednost jednostavnijeg postupka kalibracije.

LITERATURA

[1] Jursinic PA. Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters, OSLDs, for clinical dosimetric measurements. Med Phys 2007;34:4594-4604.

[2] Yukihara EG, Mardirosian G, Mirzasadeghi M, Ahmad S. Evaluation of Al_2O_3:C optically stimulated luminescence (OSL) dosimeters for passive dosimetry of high energy photon and electron beams in radiotherapy. Med Phys 2008;35:260-269.

[3] Aznar MC, Andersen CE, Botter-Jensen L, Bäck SAJ, Mattsson S, Kjær-Kristoffersen F, Medin J. Real time optical fibre luminescence dosimetry for radiotherapy: physical characteristics and applications in photon beams. Phys Med Biol 2004;49:1655-1669.

[4] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). Evaluation of measurement uncertainty – Guide to the expression of uncertainties in measurement, GUM 2008.

[5] Yukihara EG, Whitley VH, McKeever SWS, Akselrod AE, Akselrod MS. Effect of high-dose irradiation on the optically stimulated luminescence of Al_2O_3:C. Radiat Meas 2004;38:317-330.

[6] Mrčela I, Bokulić T, Budanec M, Kusić Z. Calibration of p-type silicon diodes for in-vivo dosimety in ^{60}Co beams. Zbornik radova Šestoga simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja; 18–20 travnja; 2005 Zagreb, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2005. str. 300-5.

CALIBRATION OF OPTICALLY STIMULATED LUMINESCENCE (OSL) DOSIMETERS FOR *IN-VIVO* DOSIMETRY IN RADIOTHERAPY

Iva Mrčela, Tomislav Bokulić, Mirjana Budanec, Željko Soldić, Ana Fröbe and Zvonko Kusić
University Hospital "Sestre milosrdnice",
Department of Oncology and Nuclear Medicine, Zagreb, Croatia
imrcela@kbsm.hr

In this work we have investigated the properties of a commercial OSL system (InLight dot dosimeters and microStar reader, Landauer, USA) based on a carbon doped aluminium oxide (Al_2O_3:C) dosimeters for patient dose verification by entrance dose measurements in ^{60}Co external beam radiation therapy. Reading uncertainty of a single dosimeter was 0.6 %, reproducibility of a set of dosimeters after a single irradiation was 1.6 %, while in repeated irradiations of the same dosimeters it was found to be 3.5 %. When OSLDs were optically bleached between exposures, the reproducibility of repeated measurements improved to 1.0 %. The comparison was made between the IAEA proposed method of individual OSLD calibration combined with correction factors for nonlinearity and alternative method with calibration curve based on the dose response and predetermined OSLD sensitivity factors. Determination of percentage differences between the measured and expected entrance dose on the Alderson phantom, showed smaller differences for the alternative calibration method, which has also turned out to be more practical one.

SURVEY OF EQUIPMENT QUALITY CONTROL IN RADIOTHERAPY CENTERS IN CROATIA: FIRST RESULTS

Slaven Jurković[1], Ana Diklić[1], Mladen Kasabašić[2], Đeni Smilović Radojčić[1], Manda Švabić[1], Ana Ivković[2] and Dario Faj[2]
[1]University Hospital Rijeka, Radiotherapy Department, Physics Division, Rijeka, Croatia
[2]University Hospital Osijek, Radiotherapy and Oncology Department, Osijek, Croatia
slaven.jurkovic@ri.t-com.hr

INTRODUCTION

Implementation of advanced radiation therapy techniques into clinical practice has a paramount influence on tumour control as well as normal tissue sparing. Introduction of Conformal Radiation Therapy (CRT) and Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT) into clinical practice results in precise 'tailoring' of dose distributions and according to that in reduction of irradiated volumes. This is not possible without, for the application of advanced radiation therapy techniques constructed, linear accelerators. These accelerators must be very precise, well tuned and maintained. In this way the milestone of radiation therapy quality assurance programme is machine quality control (QC).

First step in development of quality control programme is existence of written QC protocols. The survey of existence of written QC protocols showed the lack of written protocols for QC procedures in Croatian radiotherapy departments [1]. In this way regular implementation of the procedures are usually left to the conscience of the medical physicists. In the IAEA granted projects CRO6008 and RER9093, we harmonized existing QC protocols between radiation therapy departments at University hospitals Rijeka and Osijek and developed the new ones. The protocols made according to international guidelines [2–4] are publicly available at websites of the State Office for Radiological and Nuclear Safety [5] and Croatian medical physics society in order to help other radiotherapy departments in Croatia to develop their own ones.

Next step was reviewing of QC practices in different centres and exchanging experiences. For that purpose we defined a set of tests,

according to the existing QC protocols. Then, on-site measurements were done to check QC parameters of linear accelerators and simulators in six radiation therapy centres in Croatia. In this paper we present the tests preformed, devices and analysing tools used, along with the overall results.

MATERIALS AND METHODS

Tests were preformed in six radiotherapy centres in Croatia (3 in Zagreb, 1 in Split, Osijek and Rijeka), on nine linear accelerators and six simulators. Procedures for respective tests were extracted from written and well established QA/QC protocols of University hospital Rijeka and University hospital Osijek. The following tests were performed:

Table 1. Tests performed on linear accelerators

TEST	CRITERION	TOLERANCE
optical distance indicator	mech. acc.*	2 mm
field size indicators	mech. acc.*	2 mm on each edge
crosshair intersection stability with collimator rotation	mech. acc.*	radius 1 mm
laser alignment with isocenter	mech. acc.*	2 mm
light/radiation coincidence (symmetric and asymmetric fields)	rad. acc.**	2 mm on edges; 1 mm on central axis
collimator rotation	rad. acc.**	2 mm
gantry rotation	rad. acc.**	2 mm
treatment couch rotation	rad. acc.**	2 mm
leaf positions with MLC (multileaf collimator)	rad. acc.**	2 mm
symmetry/flatness	rad. acc.**	± 5 %
flat panel parameters	rad. acc.**	vendor specifications for caution and reject level

* mechanical accuracy
** radiation accuracy

Tests were performed using tools which are regularly used in performance of our periodic QC routines. In this way we used the mechanical distance indicator, multi-purpose precision alignment device Iso-Align (Civco), constancy check device of all essential beam parameters QuickCheck Webline (PTW), QC3 and FC-2 phantoms and PIPSPro

programme package for the checks of portal imaging device parameters [6], and X-Omat V (Kodak) radiographic films, DosimetryPro scanner (Vidar) and Coherence Physicist WS (Siemens) for radiation accuracy tests. Some tests were not preformed on all machines since some of the accelerators are old and not equipped with multileaf collimators or electronic portal devices.

Conventional simulators are also important part of radiotherapy equipment. They are used to simulate geometrical parameters of a treatment machine such as the gantry or collimator angle, field size, etc., and therefore have to be equal by its characteristics. Several measurements were done on six simulators, some of them testing mechanical and some, the radiation accuracy. Following tests were performed:

Table 2. Tests performed on conventional simulators

TEST	CRITERION	TOLERANCE
field size indicator	mechanical accuracy	2 mm
crosshair intersection stability	mechanical accuracy	2 mm
laser alignment with isocenter	mechanical accuracy	2 mm
light/radiation coincidence	radiation accuracy	2 mm
collimator rotation	radiation accuracy	2 mm

RESULTS

For the purpose of this work we collected a large number of data which were statistically analyzed. It showed a great variety in values regarding parameters which were tested.

First, we investigated the mechanical and geometrical characteristics of linear accelerators. The precision of optical distance indicator (ODI), lasers, crosshair intersection stability with collimator rotation and field size are showed in Figure 1.

Regarding mechanical accuracy of the machines, results showed that crosshair intersection stability with collimator rotation was most frequently out of tolerance. Namely, 22.2 n % of values are larger then 2 mm. Other values are mainly in tolerance.

Analysis of tests used to check radiation accuracy showed that rotation of treatment couch and gantry was troublesome. Over 20 % of the values obtained with these tests were over 2 mm (Figure 2a). Also, machines equipped with a multileaf collimator have 25 % out – of – tolerance values

for width of stripes in MLC grid test [5] (Figure 2b). Results are also divided in two categories within tolerance values having in mind that values between 1 – 2 mm are already a caution level.

Figure 1. Mechanical accuracy

Figure 2. a) Radiation accuracy, b) MLC parameters

The light/radiation coincidence in symmetric and asymmetric fields is presented in Figure 3.

The light/radiation coincidence in symmetric and especially asymmetric fields is an important test due to frequent use of half-fields in radiotherapy (opposed tangential fields technique for breast cancer, ConPass technique for head and neck cancer). Overlapping or distinction in asymmetric fields can result in non-precise dose delivery therefore causing

damage of organs at risk or low tumor control. Therefore, 46.2 % of out – of – tolerance values on central axis for asymmetric fields seem to be quite significant. The values for symmetric fields are mostly in tolerance.

Figure 3. Light/radiation coincidence

Flatness and symmetry were checked using PTW QuickCheck Webline system for both photons (on two different depths) and electrons. Since the accuracy of this system is lower then checking radiation parameters in water phantom, tolerance values are increased a bit. Results are presented in Figure 4.

Figure 4. Flatness

Results showed great stability in symmetry value but also some out-of-tolerance values for flatness, especially for measurements for photons on larger depth. Namely, 29.4 % of measurements showed flatness greater then 5 % (Figure 4).

Some linear accelerators in Croatia (five of nine) are equipped with the system for portal imaging. Unfortunately, only two of them were suitable for measurements at the time of our collection of data. Tested parameters were resolution f_{50}, f_{40}, f_{30}, contrast to noise ratio (CNR), noise, field size and central axis deviation. Measured values were highly in tolerance.

Measurements performed on simulators (Table 2) showed that all values were in tolerance except for the laser alignment which showed out-of-tolerance values in 8.3 % of cases.

These results were expected since radiotherapy equipment for QC is still not recognized as an important issue from some hospitals management. Therefore, existence of equipment for QC is more exception than rule and written QC protocols do not exists in more than half Croatian radiotherapy departments [1].

CONCLUSION

Quality assurance of radiotherapy machines is essential in reducing uncertainties and errors in whole radiotherapy procedure. Upgrading the QA/QC in radiotherapy departments in Croatia is an ongoing process. Large improvements can be seen especially now because lot of new, very sophisticated equipment has been acquired recently. We proposed a unique QA manual that can be used for this equipment in whole Croatia. Measurements shown in this paper were used for sharing experience with medical physicists working at radiotherapy departments in Croatia. If, at least, similar QC protocols were used in Croatia, it would be possible to do the intercomparison of results among the different centres. This is necessary for clinical trials and also for sharing clinical radiotherapy experience and transferring it between centres [7]. The work, presented in this paper, is an effort in establishing uniformity in quality assurance programmes among radiotherapy centres in Croatia, especially since the equipment is very similar in these six locations.

LITERATURE

[1] Svabić M, Jurković S, Faj D, Kasabasić M, Smilović Radojcić D, Ivković A. Practises of radiotherapy equipment quality control in radiotherapy centres in Croatia. Antropol 2008; 32.Suppl.2:217-219.

[2] Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40. Comprehensive QA for radiation oncology. Medical Physics 1994; 21 No 4.

[3] Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 45. AAPM code of practice for radiotherapy accelerators. Medical Physics 1994; Vol. 21 No 4.

[4] Izewska J, Svensson H, et al. Guidelines for comprehensive audit of radiotherapy practise: a tool for quality improvement. IAEA; 2006.

[5] www.dzns.hr

[6] Rajapakshe R, Luchka K.B, Shalev S. A quality control test for electronic portal imaging devices. Medical Physics 1996;23:1237-1244.

[7] Podgorsak EB. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. IAEA;2005.

KONTROLA KVALITETE TERAPIJE ZRAČENJEM U KBC RIJEKA

Đeni Smilović Radojčić, Manda Švabić, Ana Diklić i Slaven Jurković
KBC Rijeka, Klinika za radioterapiju i onkologiju,
Odsjek za radiofiziku i dozimetriju, Rijeka
jenny_smilrad@net.hr

UVOD

Primjena naprednih tehnika ozračivanja (konformalna radioterapija – CRT i jakosno modulirana radioterapija – IMRT) u suvremenoj terapiji zračenjem omogućuje ozračivanje visokom dozom područje tumora i znatno bolju poštedu zdravog tkiva, koje se nalazi u području oko ciljnog volumena. S druge strane njihova primjena postavlja dodatne uvjete na preciznost uređaja koji se koriste u terapiji, kao i na uporabu pomagala za pozicioniranje i fiksaciju bolesnika. U svrhu osiguranja nužnih uvjeta za kvalitetnu terapiju zračenjem potreban je stalan nadzor nad varijabilnim parametrima sustava. Posebno je važno minimizirati pogreške vezane za ljudski faktor što se može postići izradom i provođenjem protokola vezanih uz pojedine dijelove procesa terapije zračenjem, kao i uspostavom sustava neovisne dvostruke kontrole.

U KBC Rijeka unatrag nekoliko godina postoji oprema pomoću koje je moguće ne samo izvođenje složenih tehnika terapije zračenjem, već i provođenje kontrole većeg dijela radioterapijskog sustava. Tako, osim linearnih akceleratora s višelamelarnim kolimatorom, CT simulatora, 3D sustava za planiranje terapije, onkološkog informacijskog sustava, koristimo i napredne dozimetrijske sustave, alate za kontrolu kvalitete i različite, kako "geometrijske", tako i antropomorfne fantome, u kojima je moguće mjeriti dozu, odnosno raspodjelu doze. Sve je to nužno kako bi stvarna, bolesniku predana, raspodjela doze bila što sličnija isplaniranoj.

U radu će biti prikazan samo dio programa koji se sastoji od provjera raspodjele doze u antropomorfnim fantomima koje je nužno izvesti prije izvođenja terapije zračenjem.

MATERIJALI I METODE

Trodimenzionalna konformalna radioterapija je složen proces koji počinje uzorkovanjem individualiziranih digitalnih podataka o anatomskom području od interesa bolesnika. Potom se ti podaci koriste za 3D prikaz anatomskog područja od interesa na osnovu kojeg se planira složena konformalna terapija zračenjem tumorskog tkiva. Korištenje te tehnike planiranja i samog izvođenja terapije zračenjem omogućava bolju kontrolu tumora, u odnosu na primjenu konvencionalnih tehnika, jer omogućuje povećanje doze zračenja na tumorsko tkivo uz istovremenu veću poštedu zdravog tkiva. Da bi ovako složenu i izrazito zahtjevnu tehniku terapije zračenjem mogli primjeniti moraju biti zadovoljeni dodatni zahtjevi na visoku preciznost u određivanju i predanoj dozi zračenja.

Da bismo to postigli osmišljen je program kontrole kvalitete koji se redovito provodi. U okviru njega je nužno vršiti kontrolu nad svim čimbenicima radioterapijskog procesa. U KBC Rijeka za svaki dio programa postoje pisani protokoli napravljeni prema međunarodnim standardima [1-3] koji se izvode na dnevnoj, tjednoj, mjesečnoj, tromjesečnoj i godišnjoj razini. Neki od njih se mogu naći na stranicama Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost [4].

Kontrola kvalitete uređaja se sastoji od provjera vezanih za njihove mehaničke i radijacijske karakteristike. Njima se provjerava jesu li parametri uređaja unutar specificiranih tolerancija. Dodatno se ispituju parametri snopova zračenja koji se koriste za terapiju, u svrhu usporedbe i održavanja trenutnih vrijednosti s onima izmjerenim prilikom mjerenja vezanih za pripremu sustava za planiranje terapije. Razlog tome je, što se prilikom pripreme sustava za planiranje za kliničku uporabu (modeliranje snopova) eksperimentalni podaci koriste za što bolju prilagodbu matematički modeliranih podataka (Slika 1). U slučaju da su odstupanja veća od 1 %, prema našim protokolima, nužno je podešavanje snopova od ovlaštenog servisera. Važan dio programa je i kontrola kvalitete procesa terapije zračenjem. Stoga je uspostavljen sustav pomoću kojeg se moguće greške uzrokovane ljudskim faktorom nastoje smanjiti na najmanju moguću mjeru. Provodi se sustav neovisne dvostruke kontrole te su protokolima definirane radnje koje treba poduzeti u određenim specifičnim situacijama.

a b

Slika 1. Modelirane i izmjerene krivulje a) postotne dubinske doze, b) profila polja

Program kontrole kvalitete sustava za planiranje terapije je vrlo obiman i u nekim dijelovima prilično složen. Stoga ćemo u radu prikazati rezultate provedbe samo jednog dijela programa vezanog za usporedbu apsorbirane doze izračunate pomoću sustava za planiranje terapije i izmjerene u antropomorfnom fantomu CIRS Thorax (Slika 2).

Slika 2. a) Antropomorfni fantom CIRS-Thorax b) CT presjek fantoma s označenim točkama

U tu svrhu je osmišljeno i provedeno niz testova [5,6]. Fantom korišten u provjerama sastavljen je od materijala različitih gustoća i sa mogućnošću da se pojedini njegovi dijelovi zamijene umecima koji služi kao nosači ionizacijske komore tipa Farmer. Na CT Simulatoru uzorkovani su presjeci fantoma svakih 3 mm.

Podaci su transferirani u sustav za planiranje terapije zračenjem (CMS XiO) uz pridruživanje elektronskih gustoća primjenjujući konverzijske tablice korištenog napona cijevi CT uređaja.

Provedeno je pet testova kojima su ispitivani različiti parametari snopova zračenja koji se koriste za terapiju.

- Test 1. Referentno polje – cilj je verificirati izračun absorbirane doze referentnog polja (veličina polja 10×10 cm^2, Gy = 0°, Co = 0°, SSD = SAD = 100 cm)
- Test 2. Tangencijalna polja – cilj je verificirati izračun u slučaju nedostatka tkiva i pomanjkanje raspršenog zračenja
- Test 3. *Box* tehnika – cilj je verifikacija izračuna u pojedinačnim poljima i ukupne doze predane sa sva četiri polja (veličine polja pri poziciji stativa 0° i 180° je 12×10 cm^2, a pri poziciji stativa 90° i 270° je 12×8 cm^2, Co = 0°, SAD = 100 cm, bez modifikatora polja)
- Test 4. Tri asimetrična polja, dva s klinovima – cilj ovog testa je verifikacija izračuna doze kod polja s klinovima i s asimetričnim kolimatorima (veličine polja pri poziciji stativa 0° je 12×10 cm^2, bez modfikatora polja, a pri poziciji stativa 90° i 270° su 10×6 cm^2 asimetrično sa klinovima od 30°, Co = 0°, SAD = 100 cm)
- Test 5. Pet višelamelarnim kolimatorom oblikovanih polja – cilj ovog testa je verifikacija izračuna kod polja koja su nepravilna Co = 0°, Gy = 0°, 65°, 105°, 257°, 299°)

Broj monitorskih jedinica korištenih za ozračivanje fantoma prilikom mjerenja izračunat je računskim algoritmom koji se koristi i za planiranje terapije (superpozicija) za dvije različite energije fotonskih snopova 6 MV i 15 MV. Za mjerenje su korišteni elektrometar PTW UNIDOS i ionizacijska komora tipa Farmer (PTW 30002). Mjerenja su izvršena na linearnom akceleratoru Oncor Impression (Siemens). Kod svih testova mjerenja smo izvršili u nekoliko različitih točaka. U svakoj točki smo izveli po tri mjerenja. Tako dobivene mjerene rezultate usporedili smo s izračunatim vrijednostima doze dobivenim iz sustava za planiranje CMS XiO.

Za vrednovanje dobivenih rezultata koristili smo formulu [5]:

$$\Delta(\%) = \frac{(D_{TPS} - D_{mjereno})}{D_{mjerenoref}} \times 100 \qquad (1)$$

gdje su:
Δ – odstupanje između izmjerene i izračunate vrijednosti absorbirane doze
D_{TPS} – izračunata vrijednost absorbirane doze u određenoj točki
$D_{mjereno}$ – izmjerena vrijednost absorbirane doze u toj istoj točki
$D_{mjereno,ref}$ – izmjerena vrijednost absorbirane doze u referentnoj točki.

REZULTATI

Izmjereni podaci, tolerancija i izračunata odstupanja su prikazani u Tablici 1.

Tablica 1. Odstupanja izmjerenih vrijednosti u odnosu na izračunate vrijednosti za pojedine testove

test	**točka mjerenja**	**tolerancija**	Δ (%) **6 MV**	Δ (%) **15 MV**
1	1	2	+0.45	-0.2
	3	2	-0.5	+1.05
	5	2	+0.67	+0.95
	9	4	-1.77	+3.7
	10	3	-1.55	+0.47
2	1	3	+2.1	+2.3
3	3	3	-1.86	-1.3
	4	3	-1.32	-1.34
	5	3	+0.75	-0.45
	6	4	+3.12	+2.09
	8	4	-0.44	-0.47
	10	4	+0.25	-0.04
4	5	3	-1.18	-2.1
5	3	3	-1.55	-1.7
	4	3	+1.16	-1.69
	8	4	+2.37	+0.38
	10	4	-1.59	-3.03

Izračunate i izmjerene vrijednosti se dobro slažu za oba fotonska snopa. Nešto veća odstupanja su uočena samo u području malih gustoća (točke broj 6, 7, 8 i 9). Vrlo vjerojatan razlog leži u činjenici da se ionizacijska komora uporabom različitih faktora učini "tkivu ekvivalentnom" pa u području gdje je gustoća znatno manja od tkiva predstavlja dodatnu nehomogenost koja nije definirana u sustavu za planiranje. Zbog toga pogreška u izračunu nije zanemariva.

ZAKLJUČAK

Na temelju usporedbe izmjerenih i izračunatih vrijednosti može se zaključiti da su fotonski snopovi zračenja dobro modelirani, odnosno da parametri oba fotonska snopa do na veliku točnost odgovaraju matematički modeliranima. To znači da je sustav za planiranje spreman za kliničku uporabu.

LITERATURA

[1] AAPM code of practice for radiotherapy accelerators - Report of AAPM Radiation Therapy Task Group N°45, Medical Physics Vol.21 N° 4, 1994

[2] Comprehensive QA for radiation oncology - Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40, Medical Physics Vol.21 N° 4, 1994

[3] International Atomic Energy Agency (IAEA). Guidelines for comprehensive audit of radiotherapy practise: a tool for quality improvement, Vienna, IAEA, 2007.

[4] www.dzzz.hr

[5] International Atomic Energy Agency (IAEA). Commissioning and QA of computerized planning systems for radiation treatment of cancer, Vienna, IAEA, 2004.

[6] International Atomic Energy Agency (IAEA). Commissioning of radiotherapy treatment planning systems: Testing for typical external beam treatment techniques, Vienna, IAEA, 2008.

QUALITY CONTROL OF RADIOTHERAPY IN UNIVERSITY HOSPITAL RIJEKA

Đeni Smilović Radojčić, Manda Švabić, Ana Diklić and Slaven Jurković
University Hospital Rijeka, Radiotherapy Department,
Physics Division, Rijeka, Croatia
jenny_smilrad@net.hr

The goal of radiotherapy is to irradiate up high doses tumor volume and safety zone around it. Additional demand is to spare healthy tissues as much as possible. In UH Rijeka there is equipment using which that demands could be satisfied. Beside linear accelerators with multileaf collimators, CT simulators, 3D treatment planning system and record and verify system we use advanced dosymetry systems, tools for quality control as well as different "geometrical" and antrophomorfic phantoms.

Clinicaly good plan could be accomplished using CT simulator for the images aquisition of volume of interest. This must be followed by precise countouring of different anatomical structures and tretment planning on treatment planning system. At this point this plan is still virtual.

It is further neccessary that real to the patient delivered dose distribution accomodate the calculated one as accurate as possible. That could be the case only if mechanical and radiation parameters of machines used lie deep into the specified tolerances. Additionaly, it is necessary to verify dosimetricaly whether characteristics of radiation beams are inside the limits specified in time of beam modelling.

At the end, before clinical utilization, dose distribution measurements in atrophomorphic phantoms are required. Therefore, in case that measured dose distribution accomodate planned one, virtual plan becames real.

UTJECAJ POGREŠKE U POLOŽAJU BOLESNIKA TIJEKOM ZRAČENJA ZDJELICE NA RASPODJELU DOZE

Mladen Kasabašić[1], Vedran Rajevac[2], Slaven Jurković[3], Ana Ivković[1], Hrvoje Šobat[2] i Dario Faj[1]
[1]Kliničko-bolnički centar Osijek, Odjel radioterapije i onkologije, Osijek
[2] Klinička bolnica "Sestre milosrdnice", Klinika za tumore, Zagreb
[3]Klinički bolnički centar Rijeka, Klinika za radioterapiju i onkologiju, Odsjek za radiofiziku i dozimetriju, Rijeka
mkasabasic@mefos.hr

UVOD

Radioterapija megavoltnim snopovima fotona linearnog akceleratora je oblik lokalnog onkološkog liječenja. Njen cilj je predati propisanu apsorbiranu dozu ciljnom volumenu, uz što manju dozu okolnom, zdravom tkivu. Proces se sastoji od niza koraka u kojima sudjeluje tim stručnjaka iz različitih područja. Veliki broj postupaka i ljudi uključenih u radioterapijski proces, nepouzdanosti uređaja, te pomaci bolesnika i unutrašnjih organa tijekom terapije mogu uzrokovati odstupanja između planirane i stvarne raspodjele doze [1-4].

Radioterapija zdjelice primjenjuje se kod bolesnika s ginekološkim i rektalnim tumorima. Propisane doze kod zračenja takvih tumora mogu izazvati nuspojave uzrokovane ozračivanjem okolnih zdravih tkiva, ponajviše tankog crijeva. Postavljenjem bolesnika u potrbušni položaj na pomagalo za imobilizaciju i pozicioniranje – podložak s rupom (engl. *bellyboard*), postiže se izmještanje tankog crijeva izvan zdjelice i bitno smanjuje njegov volumen u polju zračenja. Problem je što se istovremeno može ugroziti reproducibilnost preciznog položaja bolesnika [5,6]. Uzroke varijabilnosti položaja bolesnika tijekom terapije možemo podijeliti na slučajne i sistematske. Slučajne pogreške su nasumične i nemoguće ih je spriječiti. Prilikom planiranja radioterapije predviđamo ih i uključujemo ih u ciljne volumene dodajući volumenima sigurnosni rub [1]. Sistematske pogreške, ukoliko postoje, prisutne su tijekom dijela ili čak cijele terapije. Utjecaj sistematskih pogrešaka potrebno je umanjiti kako bi razlika planirane i stvarno primljene doze bila čim manja.

Prije početka radioterapije potrebno je napraviti plan zračenja, odnosno izračunati raspodjelu doze u anatomskom području od interesa (engl. *region of interest*, ROI). Valjanost plana zračenja procjenjuje se prema dozno – volumnom histogramu (DVH). Analizira se pokrivenost planiranog volumena (engl. *PTV conformity index,* CI_{PTV}), predviđena doza zračenja na vitalne rizične organe i jednoličnost raspodjele doze u ciljnom volumenu (engl. *homogeneity index, HI*).

U radu smo prikazali odstupanja raspodjele doze unutar područja od interesa zbog pogreške u položaju bolesnika. Uz to, ispitali smo utjecaj pogreške u položaju bolesnika na veličine koje služe za procjenu kvalitete plana.

MATERIJALI I METODE

Pogreške u položaju bolesnika ispitane su u skupini od 35 bolesnika zračenih na područje zdjelice uz imobilizaciju "belly-boardom". Pogreške su bile u rasponu od -19,2 mm do 30,5 mm, od -30,3 mm do 15,4 mm i od -14,7 mm do 18 mm u smjerovima: antero-posteriornom (AP), kaudo-kranijalnom (CC) i medio-lateralnom (ML), redom. Izračunate sistematske pogreške dosezale su 12 mm u CC i AP smjeru, a 9 mm u ML smjeru [1]. Rotacija područja od interesa je također opažena i iznosila je do 14° [3].

Nakon toga je, za 5 bolesnika, izrađen 3 – D konformalni plan zračenja – izocentrički s tri snopa (Slika 1), s propisanom dnevnom dozom od 1,8 Gy do ukupne doze od 50,4 Gy na ciljni volumen. Ciljni volumen određen je tako da načelno obuhvaća ležište odstranjenog tumora i različite skupine limfnih čvorova zdjelice, koje ovisno o vrsti tumora predstavljaju povećani rizik za povrat bolesti. Planovi su rađeni pomoću 3D sustava za planiranje terapije zračenjem, XiO (CMS Inc., St. Louis, MO) za linearni akcelerator Siemens Mevatron MD2 s višelamelarnim kolimatorom. Valjanost plana procijenjena je prema dozno – volumnom histogramu. Tada su isti planovi ponovno izrađeni na jednaki način, samo s pomaknutim izocentrom za prije izmjerene vrijednosti. Izocentar je pomican u smjerovima koordinatnih osi po 3 mm do ± 3 cm u AP, CC i ML smjeru redom.

Za sve radioterapijske planove dobivene na gore opisani način usporedili smo DVH, CI_{PTV} i *HI*, te dozu na okolno zdravo tkivo u planiranom položaju i u položajima koji odstupaju od planiranih.

CI_{PTV} smo računali prema:

$$CI_{PTV} = V_{PTV95\%} / V_{PTV} \qquad (1)$$

gdje je $V_{PTV95\%}$ volumen PTV-a koji je primio najmanje 95 % tražene doze, a V_{PTV} je volumen PTV-a. Plan smo smatrali prihvatljivim uz uvjet $CI_{PTV} > 0{,}97$, odnosno ako je barem 97 % PTVa ozračeno s 95 % tražene doze. Ograničenje ove veličine je da nije osjetljiva na volumen ozračenog okolnog tkiva.

Slika 1. Položaj bolesnika je na trbuhu u "belly-boardu". Na slici je označen planirani ciljni volumen (PTV) i snopovi linearnog akceleratora.

Zbog toga smo promatrali i promjenu *CI'*, veličine koja uzima u obzir i volumen zdravog tkiva koji je ozračen s dozom većom od 95 % propisane doze [7]:

$$CI' = \frac{V_{PTV}}{V_{95\%}}\left(1 - \frac{V_{PTV<95\%}}{V_{PTV}}\right) = \ldots = \frac{V_{PTV\,95\%}}{V_{95\%}} \qquad (2)$$

gdje je $V_{PTV<95\%}$ volumen PTVa ozračen s manje od 95 % tražene doze, a $V_{95\%}$ volumen tkiva (ne samo PTVa) ozračen s više od 95 % tražene doze. Iz definicije je vidljivo da *CI'* nema smisla ukoliko je dozom većom od 95 % ozračen samo dio PTVa. Dakle, *CI'* je dobar pokazatelj ozračenosti okolnog tkiva ukoliko je CI_{PTV} zadovoljavajući. Kako se vidi *CI'* je uvijek manji od 1, a okolno tkivo je tim manje ozračeno čim je *CI'* bliži 1.

HI opisuje odstupanje doze u planiranom volumenu od prepisane doze i definira se kao omjer maksimalne doze u PTVu i planirane doze. Preporuka je da maksimalna doza unutar PTVa bude manja od 107 % propisane doze, s tim što maksimum doze ne smije biti izvan PTV-a [8].

Dakle, *HI* dobrog radioterapijskog plana je manji od 1,07. Kako je važan i volumen tkiva ozračenog visokom dozom dana je dodatna veličina koja opisuje jednoličnost doze u PTV-u, *HI'* [9,10]:

$$HI' = \frac{D_2 - D_{98}}{D_P} \qquad (3)$$

gdje D_2 označava dozu kojom je ozračeno 2 % PTV-a, a D_{98} 98 % PTV-a, *Dp* je doza propisana na PTV. *HI'* dobrog radioterapijskog plana treba biti čim bliže nuli.

REZULTATI

Terapijski planovi 5 simuliranih bolesnika odabrani su na osnovi analize DVH, te $CI_{PTV} > 0{,}97$. *CI'* je bio u rasponu od 0,755 do 0,775 za te planove.

Prikaz promjene CI_{PTV} i *CI'*, za jednog bolesnika, pri pomacima izocentra do ± 3 cm od planiranog položaja dan je na Slici 2.

Slika 2. Prikazane su ovisnosti CI_{PTV} i *CI'* o pomaku izocentra u sva tri smjera za jednog bolesnika. Naznačena je i vrijednost kod koje plan više ne smatramo prihvatljivim ($CI_{PTV} < 0{,}97$).

Slika 3. Ovisnost *HI* o pomaku izocentra u sva tri smjera. Naznačena je i vrijednost kod koje plan više ne smatramo prihvatljivim *HI* > 1,07.

HI koji opisuje jednoličnost doze u PTVu bio je od 1,054 do 1,065, a *HI'* od 0,075 do 0,089 za radioterapijske planove 5 bolesnika.

Promjena *HI* kada se položaj izocentra mijenja prikazana je na Slici 3, a *HI'* na Slici 4.

Slika 4. Ovisnost *HI'* o pomaku izocentra u sva tri smjera. Plan je tim bolji čim je *HI'* manji.

Slika 5 prikazuje DVH za planirani položaj izocentra i za najveće izmjereno odstupanje u AP smjeru (3 cm).

Slika 5. DVH-i za planirani položaj izocentra (crtkana linija) i za najveće odstupanje u AP smjeru (puna linija). Prikazani su PTV i okolno zdravo tkivo (TV – PTV).

ZAKLJUČAK

Odstupanja položaja bolesnika tijekom radioterapije zdjelice na ″belly-boardu″ od planiranog položaja mogu doseći i do 3 cm u AP i CC smjeru ukoliko se ne korigiraju. Takvi pomaci dovode do velikih odstupanja stvarne od planirane raspodjele doze u tkivu (Slika 5). Već i manji pomaci bolesnika (5 – 7 mm) mijenjaju CI_{PTV} do te mjere da bi radioterapijski plan smatrali neprihvatljivim zbog slabije pokrivenosti PTV-a dozom (Slika 2). Međutim CI_{PTV} se ne mijenja kada se povećava volumen ozračenog okolnog zdravog tkiva. Zbog toga je, uz CI_{PTV} dobro koristiti i CI' vrijednost koja uzima u obzir i volumen ozračenog okolnog tkiva.

Prilikom promjene položaja bolesnika jednoličnost doze u PTV-u, opisana s *HI* ne mijenja se značajno (Slika 3). Razlog tome je što je *HI* omjer maksimalne doze u PTV-u i planirane doze. Dakle, kada je maksimalna doza van PTV-a, *HI* se ne mijenja ili je čak i manji. HI' indeks ne promatra samo točku maksimuma, nego je proširen na volumene velike i male doze, te je puno osjetljiviji na pomake izocentra od *HI* (Slika 4).

Razlike između planiranog i stvarnog položaja bolesnika mogu dovesti do velike razlike u raspodjeli doze. Pomaci bolesnika su simulirani samo u smjerovima koordinatnih osi, ali ne i u proizvoljnom smjeru koji realnije opisuje stvarne pomake. Također, nije simulirana već prije opažena rotacija područja od interesa [3]. Uz ovo postoje i pomaci unutrašnjih

organa [11], pa možemo reći da su stvarni pomaci još i veći, te postoji i naglašenija razlika planirane i predane doze.

Dakle, prikazani rezultati pokazuju potrebu za smanjenjem pogrešaka u položaju bolesnika tijekom radioterapije kako bi se stvarno primljena doza što više približila planiranoj. Kako bi se to postiglo potrebno je provoditi program osiguranja kvalitete u radioterapijskom procesu.

LITERATURA

[1] Kasabašić M, Faj D, Belaj N, Faj Z, Tomaš I. Implementing of the offline setup correction protocol in pelvic radiotherapy: safety margins and number of images. Radiology and Oncology 2007;41:48-55.

[2] Kasabašić M, Faj D, Radojčić ĐS, Švabić M, Ivković A, Jurković S. Verification of the patient positioning in the bellyboard pelvic radiotherapy. Coll Antropol 2008; Suppl 32:211-215.

[3] Kasabašić M. Faj D, Ivković A, Jurković S, Belaj N. Rotation of the patients' sacrum during the bellyboard pelvic radiotherapy. Med Dosim 2010;35:28-30.

[4] Cazzaniga LF, Frigerio M. Errors in positioning the patient during transcutaneous radiotherapy of the pelvis. Radiol Med 1997;94:664-670.

[5] Ghosh K, Padilla LA, Murray KP, Downs LS,Carson LF, Dusenbery KE. Using a belly bord device to reduce the small bowel volume within pelvic radiation fields in woman with postoperatively treated cervical carcinoma. Gynecol Oncol 2001;83:271-275.

[6] Olofsen-van Acht M, van den Berg H, Quint S, de Boer H, Seven M, van Sömsen de Koste J, Creutzberg C, Visser A. Reduction of irradiated small bowel volume and accurate patient positioning by use of a bellyboard device in pelvic radiotherapy of gynecological cancer patients. Radiother Oncol 2001;59:87-93.

[7] Vincent WC, Wu DLW, Kwong Jonathan STS. Target dose conformity in 3-dimensional conformal radiotherapy and intensity modulated radiotherapy. Radiother Oncol 2004;71:201-206.

[8] International commission on radiation units and measurements (ICRU). Prescribing, recording and reporting photon beam therapy. ICRU Report 50. Bethesda, Maryland, USA: ICRU; 1993.

[9] Myonggeun Y, Sung YP, Dongho S, Se Byeong Lee, Hong Ryull Pyo, Dae Yong Kim, and Kwan Ho Cho. A new homogeneity index based on statistical analysis of the dose – volume histogram. J Appl Clin Med Phys 2007;8(2):9-17.

[10] Wu Q, Mohan R, Morris M, Lauve A, Schmidt–Ullrich R. Simultaneous integrated boost intensity-modulated radiotherapy for locally advanced head-and-neck squamous cell carcinomas. I: Dosimetric results. Int J Radiat Oncol Biol Phys 2003;56(2):573-585.

[11] van de Bunt L, Ina M, Jurgenliemk-Schulz, Gerard A.P. de Kort, Judith M. Roesink, Robbert J.H.A. Tersteeg, Uulke A. van der Heide. Motion and deformation of the target volumes during IMRT for cervical cancer: What margins do we need? Radiother Oncol 2008:88:233-240.

INFLUENCE OF DAILY SET-UP ERRORS ON DOSE DISTRIBUTION DURING PELVIS RADIOTHERAPY

Mladen Kasabašić[1], Vedran Rajevac[2], Slaven Jurković[3], Ana Ivković[1], Hrvoje Šobat[2] and Dario Faj[1]
[1]University Hospital Center Osijek, Radiotherapy and Oncology Department, Osijek, Croatia
[2]University Hospital "Sestre milosrdnice", Hospital for Tumors, Zagreb, Croatia
[3]University Hospital Center Rijeka, Radiotherapy and Oncology Department, Rijeka, Croatia
mkasabasic@mefos.hr

An external beam radiotherapy (EBRT) using megavoltage beam of linear accelerator is usually the treatment of choice for the cancer patients. The goal of EBRT is to deliver the prescribed dose to the target volume, with as low as possible dose to the surrounding healthy tissue. A large number of procedures and different professions involved in radiotherapy process, uncertainty of equipment and daily patient set-up errors can cause a difference between the planned and delivered dose. We investigated a part of this difference caused by daily patient set-up errors.

Daily set-up errors for 35 patients were measured. These set-up errors were simulated on 5 patients, using 3D treatment planning software XiO (CMS Inc., St. Louis, MO). The differences in dose distributions between the planned and shifted "geometry" were investigated. Additionally, an influence of the error on treatment plan selection was checked by analyzing the change in dose volume histograms, planning target volume conformity index (CI_{PTV}) and homogeneity index (*HI*).

Simulations showed that patient daily set-up errors can cause significant differences between the planned and actual dose distributions. Moreover, for some patients those errors could influence the choice of treatment plan since CI_{PTV} fell under 97 %. Surprisingly, *HI* was not as sensitive as CI_{PTV} on set-up errors.

The results showed the need for minimizing daily set-up errors by quality assurance programme.

RADIOEKOLOGIJA

RADIOECOLOGY

MEASUREMENT OF ^{14}C ACTIVITY IN EXHAUST AIR AT THE KRŠKO NUCLEAR POWER PLANT

Vekoslava Stibilj[1], Barbara Svetek[1], Zdenka Trkov[1], Aleš Volčanšek[2] and Borut Breznik[2]
[1]Jožef Stefan Institute, Department of Environmental Sciences, Ljubljana, Slovenia
[2]Krško Nuclear Power Plant, Slovenia
vekoslava.stibilj@ijs.si

INTRODUCTION

In a light water nuclear reactor, ^{14}C is produced by neutron activation according to the reactions $^{17}O(n,\alpha)^{14}C$ with oxygen in oxides of fuel, moderator and coolant, and $^{14}N(n,p)^{14}C$ with nitrogen as impurities in fuel, moderator and coolant [1]. For the pressurized water reactor (PWR), the estimated ^{14}C production rates are 0.57, 0.97 and 0.19 TBq $GWe^{-1}a^{-1}$ in the fuel, construction material, and coolant, respectively [1]. More than 95 % of the ^{14}C produced is released in a gaseous form through the stack of a nuclear power plant [2], mainly in CO_2 form, though the CO_2/hydrocarbons ratio may substantially differ for PWR reactors [3].

The Krško Nuclear Power plant (NPP) is a PWR Westinghouse 727 MWe reactor, situated on the left bank of the Sava River, close to the border between Slovenia and Croatia. Its operation started in 1983. The first ^{14}C measurements in air, water and plants sampled in the surroundings of the Krško NPP were already performed in 1984 and continued until now [4,5]. ^{14}C analyses in exhaust air were included in the regular radioactivity survey program in 1991 [6].

As our customer and the legislation for nuclear safety and radiation protection request accredited measurements for ^{14}C in year 2007, we validated the method for determination of ^{14}C in alkaline solution.

MATERIAL AND METHODS

Sampling

Air is continuously sampled in a bypass of the main exhaust air stream in the stack by a differential CO_2/CH_4 sampler manufactured at the Institute of Isotopes at the Hungarian Academy of Science [7]. It consists of two parallel lines for air sampling. A single membrane pump maintains a

continuous air flow at a rate around 7 L/h through each of the lines. The air in the first line passes through a 3 M sodium hydroxide trap where CO_2 is absorbed. In the second line, hydrocarbons are converted to CO_2 on Pd catalyst at about 400 ºC and thus produced CO_2 is absorbed on a second NaOH trap. Every two weeks, the traps are replaced. Monthly, the composite sample was prepared from biweekly sampling from each line and ^{14}C was determined.

Measurement

We modified the method published by Woo et al (1999) [8]. Absorbed CO_2 was precipitated as $BaCO_3$ by adding $BaCl_2$ solution. Completely dried $BaCO_3$ was finely ground in a porcelain mortar. The powder of 1 g was put in to the counting vial, which was then filled with 12 mL of the scintillator (Instagel XF, Packard Instruments). After shaking and ultrasonic agitation, the remaining volume of the vial was filled with 6 mL of 0.1 M NaOH solution. Final homogeneous mixing was obtained by ultrasonic agitation at about 40 ºC. The activity of ^{14}C was measured five times per 30 min with liquid scintillation counter (Tricarb 3170 TR/SL). To determine the efficiency of liquid scintillation counter, simultaneously the vial with working standard solution ^{14}C (~1 Bq/g) was prepared in the same media. The working standard solution was prepared from certified calibration solution (7800 Bq/g) produced by Cerca, France.

RESULTS

In year 2007 we started with validation of the method for ^{14}C determination in basic solution. Firstly, we studied the following parameters: the stability of the working standard solution in various media, the optimal mass of $BaCO_3$ to prepare the cocktail, the stability of the cocktail, the appropriate temperature in the ultrasonic bath, the chemical yield for whole procedure, the repeatability and reproducibility to prepare $BaCO_3$ from the basic solution sampling at NPP, the influence of other beta emitters present in basic solution, and we estimated measurement uncertainty. Data are shown only for determination efficiency for liquid scintillation counting (LSC).

From the results, we obtained the highest efficiency of LCS when we used 2 g of $BaCO_3$ (Figure 1). Due to high activity of ^{14}C in real basic solution we tested 1 g of $BaCO_3$ to prepare the cocktail suspension. The results are presented in Table 1.

Figure 1: The effect of mass of $BaCO_3$ to detector efficiency

Table 1: Results for ^{14}C in basic solution obtained with various masses of $BaCO_3$

Sample	**1 g $BaCO_3$** ($A_1 \pm SD$) Bqm^{-3}	**2 g $BaCO_3$** ($A_2 \pm SD$) Bqm^{-3}	**Ratio** (A_1/A_2)
CORM14-61 (A)*	8.54 ± 0.34	8.75 ± 0.34	0.976
CORM14-61 (B)*	8.57 ± 0.34	8.75 ± 0.34	0.979
CHRM14-61 (A)	9.33 ± 0.37	9.36 ± 0.37	0.997
CHRM14-61 (B)	9.23 ± 0.37	9.22 ± 0.37	1.001

*A, B – precipitation from basic solution made in duplicate, each precipitate was analysed in triplicate

With validated method we participated in proficiency tests organised by Procorad (France), National Physical Laboratories (NPL, United Kingdom) and Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN, France). The basic solution, prepared by NPL contained in 0.01 M sodium solution ^{3}H, ^{14}C, ^{99}Tc and ^{129}I. The activity range for each radionuclide, given by NPL, was from 0.1 to 2 Bq/g (Table 2).

We checked if our method is appropriate to determine ^{14}C in urine in the case of nuclear accident. In urine samples, prepared by Procorad, the ^{14}C was present in organic form. To prepare cocktail, we used the appropriate amount of urine, diluted and prepared the cocktail with $BaCO_3$, p.a. purity.

Sample E contained ^{14}C and ^{3}H in organic form. The results are presented in Table 3. We obtained good agreement between target and obtained values regardless of the sample origin. The minimal detectable ^{14}C activity is 3.33E-02 Bq. In year 2009, the method "Determination of ^{14}C in basic solution" is accredited with Accreditation Certificate no. LP-090, granted by the Slovenska Akreditacija.

Table 2: Results obtained for ^{14}C in basic solution

Year/Producer	**Sample**	**Target value** (Bq g^{-1})	**Obtained value ^{14}C** (Bq g^{-1})	**Bias (%)**
2007/NPL	B2	0.176 ± 0.001	0.154 ±0.006	12.5
2008/IRSN	Basic solution	0.298 ± 0.021	0.302 ± 0.027	1.34
2009/NPL	B1	0.905 ± 0.006	0.86 ± 0.04	5.08
2010/NPL	B1	0.1398 ± 0.009	0.142 ± 0.006	1.57

* Results are expressed with measurement uncertainty (k = 1).

Table 3: Results obtained for ^{14}C in urine in proficiency test Procorad 2009

Sample		**Target value** (Bq L^{-1})	**Uncertainty** (Bq L^{-1})	**Found value** (Bq L^{-1})	**Uncertainty** (Bq L^{-1})	**Bias** (%)
B		1.66E+02	5.81E+00	1.80E+02	1.40E+01	8
C		1.35E+03	4.05E+01	1.48E+03	7.60E+01	10
D		5.18E+03	1.55E+02	5.40E+03	2.08E+02	4
E	**^{14}C**	1.35E+03	4.05E+01	1.17E+03	1.04E+02	13
	^{3}H*	5.22E+02	2.09E+01	5.16E+02	2.59E+01	1

* ^{3}H was determined by liquid scintillation counting [9]

In Figure 2 is presented the monthly ^{14}C activity from year 2007 till 2010 and in Figure 3 the annual ^{14}C activity for the same period in exhaust air of the Krško NPP. During the refuelling in October 2007, April 2009 and October 2010 the ^{14}C activity was between 6.0E+10 and 8.0E+10 Bq.

Figure 2. Monthly average of ^{14}C activity of CO_2 and hydrocarbons in the exhaust air

Figure 3. Yearly ^{14}C activity of CO_2 and hydrocarbons in the exhaust air

CONCLUSIONS

The validated method for determination of ^{14}C in alkaline solution is appropriate to determine ^{14}C activity in stack effluent gases at Krško NPP. When the refuelling at NPP was present, the yearly activity of ^{14}C was approximately one order of magnitude higher than during the year without refuelling.

REFERENCES

[1] Wahlen M, Kunz C O. ^{14}C activity and distribution in gaseous effluents from pressurized water reactors. Transactions of the American Nuclear Society 1979;30:497-504.

[2] Kunz C. Carbon-14 discharge at the three light-water reactors. Health Physics 1985;49:25-35.

[3] Uchrin G, Csaba E, Hertelendi E, Ormai P, Barnabas I. ^{14}C releases from a Soviet designed pressurized water reactor nuclear power plant. Health Physics 1992;63:651-655.

[4] Obelić B, Krajcar Bronić I, Srdoč D, Horvatinčić N. Environmental ^{14}C levels around the 632 MWe nuclear power plant Krško in Yugoslavia. Radiocarbon 1986;28:644-648.

[5] Obelić B, Krajcar Bronić I, Barešić J, Horvatinčić N, Sironić A, Breznik B. ^{14}C in biological samples from the vicinity of NPP Krško. Proceedings of 3rd European IRPA Congress 2010, June 14-18, Helsinki, Finland. P16-06, http://www.irpa2010europe.com/proceedings/P16.htm

[6] Vokal B, Kobal I. Radiocarbon releases at the Krško nuclear power plant. Radiocarbon 1997;39:285-292.

[7] Instruction manual, Carbon-14 Differential Sampler, Institute of Isotopes of the Hungarian Academy of Sciences, H-1525 Budapest, P.O. Box 77, Hungary

[8] Woo H J, Chun S K, Cho S Y, Kim Y S, Kang D W, Kim E H. Optimization of liquid scintillation counting techniques for the determination of carbon-14 in environmental samples. J Radional Nucl Chem 1999;239:649-655.

[9] Validacija metode za določanje tritija s tekočinskim scintilacijskim štetjem, IJS, Delovno poročilo 2007, DP-9890.

UTJECAJ REMONTA NUKLEARNE ELEKTRANE KRŠKO NA AKTIVNOST ^{14}C U ATMOSFERI I BILJU

Bogomil Obelić[1], Ines Krajcar Bronić[1], Nada Horvatinčić[1], Andreja Sironić[1], Jadranka Barešić[1], Anita Rajtarić[1], Borut Breznik[2] i Aleš Volčanšek[2]
[1]Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska
[2]Nuklearna elektrarna Krško, Krško, Slovenija
Bogomil.Obelic@irb.hr

UVOD

Radioaktivni izotop ^{14}C nastaje interakcijom kozmičkih neutrona i dušika u visokim slojevima atmosfere, te se zajedno s ostalim izotopima ugljika raspoređuje u atmosferi i biosferi. Zbog istovremenog radioaktivnog raspada ($T_{½}$ = 5730 god.) stvorena je ravnotežna koncentracija ^{14}C, koja odgovara specifičnoj aktivnosti od 226 Bq/kg ugljika.

Zbog nuklearnih i termonuklearnih pokusa ova se koncentracija u šezdesetim godinama 20. stoljeća udvostručila, da bi nakon stupanja na snagu ugovora o zabrani tih pokusa u atmosferi postupno opadala, te se danas približila prirodnoj koncentraciji. Osim ovog globalnog poremećaja, koncentracija ^{14}C u atmosferi može varirati uslijed lokalnih čimbenika, npr. kao posljedica rada nuklearnih elektrana [1,2].

Cilj ovog rada je utvrditi eventualni doprinos rada elektrane povećanju specifične aktivnosti ^{14}C u bližem okolišu Nuklearne elektrane Krško (NEK), a time i povišenju efektivne doze stanovništva. Istražit će se utjecaj remonta elektrane, koji se provodi u redovitim 18-mjesečnim razmacima.

UZORKOVANJE I MJERENJE

Monitoriranje raspodjele ^{14}C u okolišu NEK se provodi redovito od 2006. mjerenjem specifične aktivnosti ^{14}C u atmosferskom CO_2 na dvije lokacije, te dva puta godišnje u biološkim uzorcima sakupljenim na više lokacija na različitim udaljenostima od NEK (Slika 1), kao i na kontrolnoj točki kod Dobove, 12 km od NEK. Integralni dvomjesečni uzorci atmosferskog CO_2 su sakupljani apsorpcijom CO_2 u zasićenoj otopini NaOH, a dobiveni Na_2CO_3 se prevodi u benzen [3,4]. Biološki uzorci su nakon sušenja i karbonizacije spaljeni u struji kisika, a dobiveni CO_2 se apsorbira u smjesi Carbosorba®E i Permafluora®E [3,5]. Aktivnost ^{14}C mjeri se scintilacijskim brojačem *Quantulus 1220* [3].

Rezultati su izraženi kao specifična aktivnost ^{14}C (Bq/kg ugljika u biološkim uzorcima, odnosno mBq/m^3 u uzorcima atmosferskog CO_2), no često i kao relativna specifična aktivnost $a^{14}C$ (omjer specifičnih aktivnosti uzorka i atmosfere prije antropogenog utjecaja), izražena u jedinicama "postotak suvremenog ugljika" ("*percent Modern Carbon*", pMC). Prema definiciji, 100 pMC odgovara 226 Bq/kgC, odnosno 46 mBq/m^3 zraka, uz pretpostavku da je koncentracija CO_2 u zraku 384 ppmV [6].

Slika 1. Položaj lokacija za sakupljanje uzoraka. **A** i **B**: lokacije za sakupljanje atmosferskog CO_2; Lokacije na kojima su sakupljani uzorci bilja: **C**, **D**, **E**, **I**, **J**, **L** i **R** (unutarnji krug) i **F**, **G**, **H**, **K**, **M**, **N**, **O**, **P** i **Q** (vanjski krug).

REZULTATI

Aktivnost ^{14}C u atmosferskom CO_2

Specifična aktivnost ^{14}C u atmosferskom CO_2 mjerena je na dvije lokacije (**A** i **B**) unutar kruga NEK (Slika 2). Na lokaciji **B** je gotovo redovito zamijećena viša aktivnost, budući da se ona nalazi u smjeru izraženijih vjetrova (Slika 3), što je posebno vidljivo u razdobljima remonta i neposredno nakon njega. Tri do četiri mjeseca nakon remonta aktivnosti ^{14}C padaju na svoje uobičajene vrijednosti. Pokazuje se odziv atmosferske aktivnosti ^{14}C na ^{14}C aktivnosti izmjerene u ispustu elektrane (Slika 2) [7].

Slika 2. Specifična aktivnost ^{14}C u atmosferskom ugljičnom dioksidu na lokacijama **A** i **B** i usporedba tih aktivnosti s onima u Zagrebu (lijeva ordinata). ^{14}C aktivnost u ispustu dana je na desnoj ordinati [7].

Slika 3. Ruža vjetrova u okolici Nuklearne elektrane Krško

Srednje vrijednosti $a^{14}C$ u atmosferskom CO_2 u godinama kada je obavljan remont (2007, 2009 i 2010) su 51,88 mBq/m^3, 51,56 mBq/m^3 i 48,66 mBq/m^3 na lokaciji **A**, odnosno 59,48 mBq/m^3, 54,92 i 61,92 mBq/m^3 na lokaciji **B**. Godine 2008., kada nije bilo remonta, te su vrijednosti bile 48,07 (lokacija **A**) i 49,17 mBq/m^3 (lokacija **B**), što predstavlja jedva vidljivo povišenje u odnosu na aktivnosti ^{14}C u atmosferi izmjerene u Zagrebu (47,66 mBq/m^3 u 2007, 47,06 mBq/m^3 u 2008 i 47,33 mBq/m^3 u 2010), u kojem je moguć i efekt smanjenja aktivnosti ^{14}C u atmosferi zbog izgaranja fosilnih goriva tijekom zime [1].

Tijekom remonta u listopadu 2007. je aktivnost ^{14}C na točki **B** pokazala znatno više vrijednosti ((126,7 ± 0,7) mBq/m^3) od one tijekom remonta u travnju 2009. ((85,1 ± 0,6) mBq/m^3), čemu je uzrok vjerojatno skraćeni period mjerenja (samo deset dana u 2007. u odnosu na tri tjedna u

2009.), koji je očito bolje koincidirao s razdobljem većeg ispuštanja ^{14}C u atmosferu. Interesantno je veliko povišenje aktivnosti na točki **B** (138,8 mBq/m^3) tijekom rujna 2010., što je posljedica povećanog ispusta iz elektrane izmjerenog tog mjeseca, iako je remont započeo tek krajem mjeseca, 30.9.2010.

Aktivnost ^{14}C u biološkom materijalu

Na Slici 4 prikazana je prostorna raspodjela $a^{14}C$ u bilju za dva tipična uzorkovanja bilja: 30. lipnja 2009., neposredno nakon remonta elektrane u travnju iste godine, te 6. srpnja 2010., prije jesenskog remonta.

Slika 4. Primjeri raspodjele specifičnih aktivnosti ^{14}C ($a^{14}C$) u uzorcima bilja u okolišu NEK uzetih tijekom dvije kampanje, VI/2009 neposredno nakon remonta, a VII/2010 bez remonta. *Lijevo*: prostorna raspodjela $a^{14}C$ (izražena u pMC, veće crne brojke). Slovo i broj: oznaka uzorka. *Desno*: odgovarajući polarni dijagrami za lokacije unutarnjeg i vanjskog kruga, koji ukazuju na ovisnost o udaljenosti i smjeru. Za usporedbu su prikazane i $a^{14}C$ izmjerene na kontrolnoj točki Dobova.

Vidljivo je da povećane ^{14}C aktivnosti u bilju raspodijeljene u skladu s prevladavajućim SW-NE smjerom vjetrova (Slika 3 i Slika 4). Na polarnim dijagramima odvojeni su rezultati za točke uzorkovanja bliže elektrani ("unutarnji krug") od onih iz "vanjskog" kruga.

U Tablici 1 prikazane su srednje vrijednosti $a^{14}C$ u bilju (jabuke, kukuruz, žitarice i trava) na lokacijama u unutarnjem i u vanjskom krugu oko NEK, te na kontrolnoj točki (Dobova) prilikom svakog uzorkovanja. Srednja aktivnost $a^{14}C$ u unutarnjem krugu je viša (110,7 pMC) u odnosu na vanjski krug (106,5 pMC), dok za kontrolnu točku iznosi 104,0 pMC.

Tablica 1. Usporedba srednjih vrijednosti $a^{14}C$ (pMC) u biološkim uzorcima u unutarnjem i u vanjskom krugu oko NEK, te na kontrolnoj točki u Dobovi

Datum sakupljanja	$a^{14}C$ [pMC]			**Napomena**
	Unutarnji krug	**Vanjski krug**	**Kontrolna točka**	
07 / 2006	120,6 ± 11,0	108,3 ± 3,0	103,2 ± 1,5	nakon remonta
10 / 2006	112,3 ± 12,0	105,1 ± 2,0	104,0 ± 1,5	
07 / 2007	103,7 ± 3,9	103,7 ± 2,8	105,6 ± 1,9	
09 / 2007	106,8 ± 1,7	105,7 ± 2,6	103,8 ± 1,8	
07 / 2008	109,6 ± 3,5	107,3 ± 1,7	104,1 ± 2,3	
10 / 2008	109,1 ± 3,3	108,4 ± 3,5	104,4 ± 2,7	
06 / 2009	117,0 ± 11,2	110,5 ± 2,0	105,4 ± 1,4	nakon remonta
09 / 2009	112,0 ± 8,5	104,8 ± 2,5	102,0 ± 1,6	
07 / 2010	105,0 ± 4,3	104,9 ± 2,3	103,7 ± 1,6	
09 / 2010	107,0 ± 2,8	104,3 ± 3,2	102,0 ± 2,5	

Povišene aktivnosti $a^{14}C$ opažene su u biološkom materijalu koji koristi CO_2 u razdoblju za vrijeme i nakon remonta obavljenog neposredno prije vegetacijskog perioda. U godinama 2006. i 2009. je remont elektrane obavljan u proljeće, tako da su jabuke, čije je razdoblje vegetacije započelo neposredno nakon toga, za fotosintezu koristile nešto aktivniji CO_2 (Slika 2). S druge strane, 2007. i 2010. je remont obavljan ujesen, tj. nakon razdoblja vegetacije i nakon što su jabuke već pobrane, pa je izmjerena $a^{14}C$ niža. Stoga je na svim lokacijama najviša aktivnost ^{14}C u biološkom materijalu bila nakon proljetnog remonta u srpnju 2006. i lipnju 2009, a zatim u listopadu 2006. i rujnu 2009., dok je u oba razdoblja tijekom 2007. (srpanj i rujan), kao i u srpnju 2010., slična onima na kontrolnoj točki kraj Dobove (Tablica 1).

PROCJENA DOZE

Ekvivalentna godišnja doza E koju primi prosječna osoba uzimanjem hrane određene specifične ^{14}C aktivnosti može se izraziti kao:

$$E = e \times a^{14}C \times m \times t \qquad (1)$$

gdje je t razdoblje od 365 dana, m masa ugljika koja se unese hranom, $a^{14}C$ je izmjerena specifična aktivnost (Bq/kg C), a e je dozni koeficijent za ^{14}C za odrasle osobe, koji iznosi $5{,}8 \times 10^{-10}$ Sv/Bq [8].

U Tablici 2 prikazane su srednje vrijednosti specifične aktivnosti $a^{14}C$ u bilju na svim lokacijama u okolini NEK i na kontrolnoj točki (Dobova), ekvivalentne godišnje doze od ^{14}C (E ^{14}C) na području NEK i na kontrolnoj točki, te povećanje E ^{14}C na području NEK u odnosu na prirodnu ^{14}C dozu izmjerenu na kontrolnoj točki (Dobova) i povećanje doze u odnosu na ukupnu prirodnu dozu u našim krajevima (1,22 mSv) [9]. Pretpostavljena je dnevna potrošnja jabuka od 0,3 kg [10], s time da se 2 mjeseca u godini uzimaju jabuke iz okoline NEK, a ostalih 10 mjeseci s kontrolne točke.

Tablica 2. Povećanje ekvivalentne doze ^{14}C i ukupne doze

Godina	$a^{14}C$ [pMC] **NEK ***	$a^{14}C$ [pMC] **Dobova**	E ^{14}C [μSv] **NEK**	E ^{14}C [μSv] **Dobova**	**Povećanje doze ^{14}C** (%)	**Povećanje ukupne doze** (%)
2006	111,6	103,5	15,04	14,86	1,29	0,0159
2007	105,0	104,7	15,03	15,03	0,04	0,0005
2008	108,8	104,3	15,08	14,97	0,71	0,0088
2009	110,8	103,8	15,07	14,90	1,11	0,0137
2010	105,6	103,7	14,93	14,88	0,30	0,0037

* srednja vrijednost aktivnosti ^{14}C bilja u oba kruga oko NEK

ZAKLJUČAK

Praćenjem ^{14}C aktivnosti u atmosferi i bilju, koje se redovito provodi od 2006. godine, dobiveni su podaci o njenoj vremenskoj i prostornoj raspodjeli u neposrednoj okolini NEK. Specifična aktivnost ^{14}C u atmosferskom CO_2 u neposrednoj okolini elektrane odražava aktivnost ^{14}C na ispustu elektrane – povišene vrijednosti opažene su samo u vrijeme izmjene gorivih elemenata (remonta) i kratko vrijeme nakon toga, a tijekom redovnog rada elektrane ^{14}C aktivnost u atmosferskom CO_2 nije značajno povišena u odnosu na "čista" područja. Prostorna raspodjela ^{14}C aktivnosti u bilju određena je prevladavajućim smjerom vjetrova, a vrijednosti su nešto

više ako se vegetacijsko razdoblje podudara s razdobljem remonta. U 2006. i 2009. godini, kada je remont proveden u proljeće, opaženo je veće povećanje doze nego u godinama kad je remont ujesen ili ga nema.

ZAHVALA

Rad je financiran sredstvima MZOŠ projekta 098-0982709-2741 i projekta monitoriranja s Nuklearnom elektranom Krško.

LITERATURA

[1] Krajcar Bronić I, Obelić B, Horvatinčić N, Barešić J, Sironić A. ^{14}C aktivnost u okolišu: atmosfera i biosfera. Arh Hig Rada Toksikol 2010;61 Suppl.:81-88.

[2] Obelić B, Krajcar Bronić I, Barešić J, Sironić A, Breznik B. ^{14}C aktivnost bioloških uzopraka i atmosferskog CO_2 u neposrednoj okolici Nuklearne elektrane Krško. U: Barišić D, Grahek Ž, Krajcar Bronić I, Miljanić S, ur. Zbornik radova Sedmog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 29-31. svibnja 2008; Opatija, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2008. str. 222-229.

[3] Horvatinčić N, Barešić J, Krajcar Bronić I, Obelić B. Measurements of low ^{14}C activities in a liquid scintillation counter in the Zagreb Radiocarbon Laboratory. Radiocarbon 2004;46/1:105-116.

[4] Barešić J, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Obelić B. Mjerenje niskih ^{14}C aktivnosti uzoraka u obliku benzena u tekućinskom scintilacijskom brojaču. U: Garaj-Vrhovac V, Kopjar N, Miljanić S, ur. Zbornik radova Šestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 18.-20. travnja 2005; Stubičke Toplice, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2005. str. 158-163.

[5] Barešić J, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Obelić B. Mjerenje niskih ^{14}C aktivnosti uzoraka pripremljenih metodom apsorpcije CO_2. U: Krajcar Bronić I, Miljanić S, Obelić B, ur. Zbornik radova Petog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 9.-11. travnja 2003; Stubičke Toplice, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2003. str. 267-272.

[6] ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_gl.txt
http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html

[7] Stibilj V, Svetek B, Trkov Z, Volčanšek A, Breznik B. Measurement of ^{14}C activity in exhaust air at the Krško Nuclear Power Plant. Zbornik radova Osmog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 13.-15. travnja 2011; Krk, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2011. (ovaj Zbornik).

[8] Novaković M: Zaštita od ionizirajućih zračenja. Propisi u Republici Hrvatskoj s komentarima. Ekoteh-dozimetrija d.o.o. za zaštitu od zračenja, Zagreb, 2001, p 121 and 84.

[9] Prosudba rizika od industrijskih postrojenja u Zagrebu. Novosti br.8, Agencija za posebni otpad, Zagreb, 1995.

[10] International Commission on Radiological Protection, Report of the task group on reference man. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 23; 1975.

IMPACT OF REFUELLING OF THE KRŠKO NUCLEAR POWER PLANT ON THE ^{14}C ACTIVITY IN THE ATMOSPHERE AND PLANTS

Bogomil Obelić[1], Ines Krajcar Bronić[1], Nada Horvatinčić[1], Andreja Sironić[1], Jadranka Barešić[1], Anita Rajtarić[1], Borut Breznik[2] and Aleš Volčanšek[2]

[1]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia

[2] Krško Nuclear Power Plant, Krško, Slovenia

Bogomil.Obelic@irb.hr

Monitoring ^{14}C activity in the atmospheric CO_2 and in biological samples (fruits and vegetables) in the close vicinity of the Krško Nuclear Power Plant (NPP) was performed regularly since 2006 to estimate the possible influence of the plant on environmental ^{14}C levels and the possible contribution to the effective dose of local population through food chain. Atmospheric CO_2 on two locations was collected regularly every two months, while the biological samples (apples, corn, wheat and grass) were collected twice a year (in June/July and September/October) on several locations very close to the plant in a radius of about 1 km from the Krško NPP, as well as on the control point at Dobova, 12 km from the plant.

Increase of ^{14}C activity in atmospheric CO_2 was always observed during and immediately after the refuelling of the power plant, which has been performed every 18 months, and it is more pronounced on the location in the SW-NE direction that coincided with the most pronounced wind directions. ^{14}C activity in plants collected close to the Krško NPP is always higher than the activities on the control point, and depends both on the distance from the exhaust of the plant ventilation system and on wind direction. Significantly higher activities in plants collected after the spring refuelling in 2006 and 2009 was measured. This can be explained by the influence of plant effluents during the summer when the process of photosynthesis is the most prominent, while autumn effluents (2007) do not significantly influence the ^{14}C activity in plants. The maximum increase of total dose to local population due to the release of ^{14}C from the Krško NPP in the years of spring refuelling was estimated to be 0.015 %, which is negligible.

MJERENJA KONCENTRACIJA SUMPOROVODIKA I RADIOAKTIVNOSTI U OKOLICI CPS MOLVE

Gordana Pehnec, Vladimira Vađić, Ivan Bešlić i Jadranka Kovač
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
gpehnec@imi.hr

UVOD

Eksploatacija energetskih sirovina, prirodnog plina i plinskog kondenzata provodi se u Podravini na području širem od 200 km^2. Prirodni plin iz 34 proizvodne bušotine zatvorenim sabirno-transportnim sustavom doprema se na obradu u centralnu plinsku stanicu (CPS) Molve. Prirodni plin, osim ugljikovodika sadrži i niz štetnih primjesa (CO_2, H_2S, RSH, Hg, voda) koje se radi zadovoljavanja kvalitete proizvoda izdvajaju raznim tehnološkim postupcima na CPS Molve. Usporedo s početkom eksploatacije prirodnog plina 1981. godine započelo se i s monitoringom okoliša. Tijekom godina provedena su sustavna mjerenja onečišćenja zraka, vode, tla, vegetacije i radioaktivnosti na području CPS Molve kao mogućeg izvora onečišćenja. Ciljana kontrola kemijskih onečišćenja provedena je u okviru Programa utvrđivanja postojećeg stanja na lokalitetu plinskog polja Molve. U ovom radu prikazani su rezultati mjerenja sumporovodika (H_2S) i radioaktivnosti u razdoblju od 2006. do 2009. godine.

MATERIJALI I METODE

Mjerenja su provedena od 2006. do 2009. godine, svake godine u razdobljima od po trideset dana tijekom ljeta te trideset dana tijekom hladnijeg doba godine (zime, kasne jeseni ili proljeća). Koncentracije sumporovodika mjerene su na četiri bušotine (M9, M10, M11 i M12) dok je radioaktivnost mjerena samo na jednoj lokaciji (M9). Položaj mjernih postaja prikazan je na Slici 1. Tijekom proljeća 2008. godine na mjernoj postaji M11 mjereni su i meteorološki parametri (smjer i brzina vjetra).

Uzorci H_2S sakupljani su prosisavanjem na filter papir Whatman No. 41 impregniran živa (II) kloridom uz dodatak uree kao antioksidansa tijekom 24 sata. Analiza H_2S provedena je spektrofotometrijskom metodom molibdenskog plavila [1,2].

Meteorološki parametri mjereni su pomoću automatske meteorološke mjerne postaje.

Mjerenja radioaktivnosti obuhvatila su neprekidno mjerenje brzine ekspozicijske doze zračenja mjernim uređajem *ALARA*. Elektronički dozimetar *ALARA* razvijen je na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu. Uređaj neprekidno mjeri ionizacijske događaje u svojoj okolini i pohranjuje podatke u desetminutnim intervalima. Spremljeni podaci iščitavaju se računalnim programom koji izračunava vrijednosti brzina apsorbiranih doza, a dobiveni su kako pisani tako i grafički zapisi brzina apsorbiranih doza. Izračunavaju se srednje dnevne vrijednosti. Uređaj je bio postavljen uz opremu za mjerenje onečišćenja zraka na lokaciji plinske bušotine M9.

Slika 1. Položaj mjernih postaja

REZULTATI I RASPRAVA

Sumarni razultati mjerenja sumporovodika u okoloci CPS Molve prikazani su u Tablici 1. Relativna učestalost smjera vjetra (%) i srednje vrijednosti brzine vjetra (m/s) po smjerovima na mjernom mjestu M11 tijekom proljeća 2008. godine prikazani su na Slici 2.

Slika 2. Relativna učestalost smjera vjetra (%) i srednje vrijednosti brzine vjetra (m/s) po smjerovima na mjernom mjestu M11 (proljeće 2008.)

U promatranom četverogodišnjem razdoblju koncentracije H_2S su se kretale od 0 do 6,59 μg/m^3 ljeti te od 0 do 4,94 μg/m^3 u hladnijem dijelu godine (zima, proljeće, jesen). Studentov *t*-test nezavisnih uzoraka pokazao je da nije bilo statistički značajne razlike između koncentracija H_2S mjerenih na 4 postaje, osim tijekom ljeta 2008. godine, kada su vrijednosti na mjernom mjestu M9 bile značajno niže u odnosu na ostale postaje. Također, na mjernim mjestima M9 i M10 koncentracije H_2S bile su statistički značajno više tijekom ljeta 2006., 2008. i 2009. godine u odnosu na hladniji dio godine, a na mjernim mjestima M11 i M12 samo tijekom 2009. godine dok za ostale godine nije dobivena statistički značajna razlika među sezonama. Više vrijednosti tijekom ljeta posljedica su jačeg isparavanja pri višim temperaturama.

Analiza rezultata mjerenja brzine i smjera vjetra tijekom proljeća 2008. godine na mjernom mjestu M11 pokazala je da su u promatranom razdoblju bili najučestaliji vjetrovi iz smjera N i ENE. Iz smjera sjevera dolazili su također i vjetrovi najvećih brzina. U dane kada su na mjernim postajama M11 i M9 izmjerene najviše dnevne vrijednosti (18. travnja – 4,16 μg/m^3 na M11 te 30. travnja – 4,85 μg/m^3 na M9) zabilježeni su vjetrovi najvećih brzina upravo iz smjera CPS Molve.

Tablica 1. Koncentracije H_2S (μg/m^3) u okolici CPS Molve (2006. – 2009.)

Mjerna postaja	Godina	Razdoblje mjerenja	*N*	*C*	C_{50}	C_{98}	C_{max}
M9	2006	Proljeće	30	0,23	0,12	0,80	0,84
		Ljeto	31	0,66	0,68	1,58	1,70
	2007	Zima	31	0,52	0,19	3,42	3,92
		Ljeto	31	0,46	0,34	1,62	1,73
	2008	Proljeće	31	1,00	0,87	4,38	4,85
		Ljeto	31	0,39	0,29	1,25	1,41
	2009	Jesen	31	0,36	0,19	1,72	2,33
		Ljeto	31	1,05	0,52	4,47	6,59
M10	2006	Proljeće	30	0,42	0,18	1,52	1,58
		Ljeto	31	0,94	0,82	2,55	2,56
	2007	Zima	31	0,81	0,29	3,19	3,22
		Ljeto	31	0,40	0,20	1,80	2,48
	2008	Proljeće	30	0,82	0,49	4,39	4,71
		Ljeto	30	0,89	0,89	2,23	2,37
	2009	Jesen	31	0,37	0,11	1,80	1,84
		Ljeto	31	0,71	0,55	2,35	2,57
M11	2006	Proljeće	30	0,78	0,57	2,80	3,56
		Ljeto	31	0,54	0,43	1,69	1,77
	2007	Zima	31	0,66	0,45	2,67	2,76
		Ljeto	31	0,75	0,31	3,22	3,45
	2008	Proljeće	31	0,98	0,72	3,21	4,16
		Ljeto	31	0,77	0,67	2,32	3,14
	2009	Jesen	31	0,34	0,18	1,09	1,14
		Ljeto	31	0,66	0,54	2,54	3,08
M12	2006	Proljeće	30	0,42	0,17	2,08	2,61
		Ljeto	31	0,36	0,20	1,70	1,90
	2007	Zima	31	0,72	0,40	4,08	4,94
		Ljeto	31	0,48	0,11	2,41	2,93
	2008	Proljeće	31	1,10	0,76	3,67	3,90
		Ljeto	30	0,86	0,85	2,83	3,31
	2009	Jesen	30	0,29	0,08	1,25	1,66
		Ljeto	31	0,89	0,54	3,89	4,53

C – srednja vrijednost C_{50} – medijan
C_{98} – 98. percentil C_{max} – najviša dnevna vrijednost

Rezultati mjerenja interpretirani su prema Zakonu o zaštiti zraka [3] te Uredbi o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku [4]. Prema Uredbi granična vrijednost (GV) za H_2S iznosi 2 $\mu g/m^3$ za vrijeme usrednjavanja od jedne godine, dok GV za 24-satni uzorak iznosi 5 $\mu g/m^3$ i ne smije biti prekoračena više od 7 puta tijekom kalendarske godine. Tijekom promatrane četiri godine GV za 24-satni uzorak bila je prekoračena samo jednom, i to na M9 tijekom ljeta 2009. godine (14. srpnja) kada je srednja dnevna koncentracija iznosila 6,59 $\mu g/m^3$.

Rezultati mjerenja radioaktivnosti elektroničkim dozimetrom *ALARA* prikazani su na Slici 3. Prikazano je kretanje brzine apsorbirane doze za vrijeme izloženosti na mjernom mjestu M9 tijekom četiri godine, od 2006. do 2009. godine. Vrijednosti brzine apsorbirane doze prikazane horizontalnim linijama predstavljaju srednje godišnje vrijednosti u pojedinom razdoblju mjerenja.

Slika 3. Brzina apsorbirane doze na lokaciji bušotine M9 plinskog polja Molve tijekom protekle četiri godine

Srednja vrijednost za bušotinu M9 za proteklih pet godina iznosi (88 ± 15) $nGyh^{-1}$. Takva brzina apsorbirane doze rezultirala bi prosječnim godišnjim doznim opterećenjem od 0,776 mSv. Godišnje dozno opterećenje u Zagrebu (lokacija IMI) u protekloj godini (2010.) iznosi 1,043 mSv.

ZAKLJUČAK

Mjerenja brzine doze zračenja provode se na području plinskoga polja Molve zbog potrebe praćenja svakog mogućeg tehnološkog povećanja prirodne radioaktivnosti. Mjerenja radioaktivnosti pokazala su da ona nije povećana radom plinskih bušotina, a primijećene varijacije nalaze se unutar normalnih fluktuacija. Mjerenja sumporovodika su pokazala da su koncentracije tijekom svih godina bile niske te nisu prelazile vrijednosti propisane Uredbom o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku.

LITERATURA

[1] Vađić V. Metoda za određivanje vodik-sulfida u atmosferi. Zašt Atm 1982; 10:116.

[2] Vađić V, Gentilizza M, Hršak J, Fugaš M. Determination of Hydrogen Sulphide in the Air. Staub Reinhalt Luft 1980;40:73.

[3] Zakon o zaštiti zraka. Narodne novine 178/2004.

[4] Uredba o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku. Narodne novine 133/2005.

MEASUREMENTS OF HYDROGEN SULPHIDE AND RADIOACTIVITY IN THE VICINITY OF THE MOLVE GAS STATION

Gordana Pehnec, Vladimira Vađić, Ivan Bešlić and Jadranka Kovač
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
gpehnec@imi.hr

Natural gas and gas condensate have been extracted from 34 bores in Podravina on an area wider than 200 km^2. The gas is then transported to the central gas station CPS Molve using a closed collection and transportation system. In addition to hydrocarbons, natural gas contains many other substances such as CO_2, H_2S, RSH, Hg, and water which have to be removed at the Molve station by different technological processes. When gas exploitation started in Molve in 1981, so did environmental monitoring of the area. Over the last thirty years, air, water, soil, vegetation, and radioactivity have been measured systematically around Molve as a potential pollution source. This paper presents the results of measurements of radioactivity and of hydrogen sulphide (H_2S) in the air for from 2006 to 2009. The measurements were carried out every year over two months; for thirty days in the summer and thirty days in the colder part of the year (winter, spring, or late autumn). Radioactivity was measured using an electronic dosimeter ALARA at monthly intervals, while H_2S samples were collected every 24 hours. Maximum daily H_2S concentrations were between 2.33 $\mu g/m^3$ (in 2009) and 4.94 $\mu g/m^3$ (in 2007) in the winter and between 2.56 $\mu g/m^3$ (in 2006) and 6.59 $\mu g/m^3$ (in 2009) in the summer. Measurements also showed that refining processes at the gas station did not increase radioactivity in the environment. Observed variations were within the normal fluctuations.

RAZINE MERKAPTANA I RADIOAKTIVNOSTI NA PLINSKOM POLJU MOLVE

Vladimira Vađić, Gordana Pehnec i Jadranka Kovač
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
vvadjic@imi.hr

UVOD

Prirodni plin iz ležišta na plinskim poljima Molve, Kalinovac, Stari Gradec i Gola duboka, uz ugljikovodike u svom sastavu, sadrži i štetne primjese ugljikov dioksid, sumporovodik, živu i merkaptane. Prirodni plin iz 34 proizvodne bušotine, preko šest plinskih stanica, zatvorenim sabirno-transportnim sustavom doprema se na obradu na centralnu plinsku stanicu (CPS) Molve. Štetan utjecaj primjesa na okoliš moguć je u okolišu CPS Molve.

MATERIJALI I METODE

Merkaptani su sakupljani na filtar papiru Whatman No. 41 impregniranom živa(II)acetatom uz dodatak octene kiseline. Koncentracija merkaptana određivana je spektrofotometrijski pomoću N,N dimetil p-fenilendiamin hidroklorida i Reissnerova reagensa [1]. Ovom metodom određuju se ukupni merkaptani, a rezultati su izraženi kao merkaptanski sumpor R-SH.

Rezultati mjerenja interpretirani su prema Uredbi o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku (NN br. 133/2005, str. 2467-2476) [2], Zakonu o zaštiti zraka (NN br. 178/2004, str. 3082-3105) [3], Pravilniku o praćenju kakvoće zraka (NN br. 155/2005, str. 3008-3029) [4] i Pravilniku o razmjeni informacija o podacima iz mreža za trajno praćenje kakvoće zraka (NN br. 135/2005, str. 3065-3072) [5].

Neprekidno mjerenje brzine ekspozicijske doze provedeno je mjernim uređajem ALARA. Elektronički dozimetar ALARA razvijen je u IMI-ju. Uređaj neprekidno mjeri ionizacijsko zračenje u svojoj okolini, a podatke pohranjuje u 10-minutnim intervalima. Uređaj je bio postavljen uz opremu Jedinice za higijenu okoline IMI-ja tijekom mjesečnog sakupljanja uzoraka merkaptana na lokaciji plinske bušotine MOLVE-10. Pohranjeni podaci očitani su računalnim programom koji izračunava vrijednosti brzina apsorbiranih doza, a dobiveni su pisani i grafički zapisi brzina apsorbiranih doza. Izračunavaju se i srednje dnevne vrijednosti.

REZULTATI

Na Slici 1 prikazane su srednje dnevne koncentracije merkaptana izmjerene tijekom zime i ljeta 2005. godine, na Slici 2 tijekom proljeća i ljeta 2006. godine, na Slici 3 tijekom zime i ljeta 2007. godine, a na Slici 4 tijekom proljeća i ljeta 2008. godine. Na Slici 5 prikazane su srednje dnevne koncentracije merkaptana izmjerene tijekom ljeta i jeseni 2009. godine.

Prema Uredbi o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku [2] GV za srednju godišnju vrijednost iznosi 1 μg m^{-3}. Granična vrijednost (GV) za 24-satni uzorak od 3 μg m^{-3} ne smije biti prekoračen više od 7 puta tijekom kalendarske godine.

Podaci dobiveni na osnovu izmjerenih koncentracija (Slike 1 – 5), pokazuju da su GV bile prekoračene tijekom tri dana u zimi 2005. godine na mjernoj postaji MOLVE-9 i 30 dana ljeti na mjernoj postaji MOLVE-10 kada je izmjerena i najviša srednja dnevna vrijednost od 89 μg m^{-3}.

Slika 1. Srednje dnevne koncentracije merkaptana izmjerene tijekom zime i ljeta 2005. godine

Slika 2. Srednje dnevne koncentracije merkaptana izmjerene tijekom proljeća i ljeta 2006. godine

Slika 3. Srednje dnevne koncentracije merkaptana izmjerene tijekom zime i ljeta 2007. godine

Slika 4. Srednje dnevne koncentracije merkaptana izmjerene tijekom proljeća i ljeta 2008. godine

Tijekom 2006. godine srednje dnevne vrijednosti bile su najviše na mjernoj postaji MOLVE-11. U proljeće je GV bila prekoračena tijekom 28 dana, a maksimalna izmjerena vrijednost iznosila je 33,9 µg m^{-3}.

Tijekom ljeta na mjernoj postaji MOLVE-11 izmjerene su nešto niže vrijednosti te je do prelaska GV došlo tijekom 6 dana, a maksimalna srednja dnevna vrijednost iznosila je 4,19 µg m^{-3}.

Izgradnjom sustava za spaljivanje otpadnih plinova 2007. godine koncentracije merkaptana su se snizile i tijekom mjernog razdoblja 2007. – 2009. nisu ni na jednoj mjernoj postaji prelazile GV.

Na Slici 6 prikazana je brzina apsorbirane doze na lokaciji MOLVE-10 od 2005. do 2009. godine. Vrijednosti brzine apsorbirane doze prikazane horizontalnim linijama predstavljaju srednje godišnje vrijednosti u pojedinom razdoblju mjerenja. Srednja vrijednost za bušotinu MOLVE-10 za proteklih pet godina iznosi (95 ± 11) nGy h^{-1}. Takva brzina apsorbirane doze rezultirala bi prosječnim godišnjim doznim opterećenjem od 0,837 mSv. Godišnje dozno opterećenje u Zagrebu (lokacija IMI) u protekloj godini (2010.) iznosilo je 1,043 mSv.

Slika 5. Srednje dnevne koncentracije merkaptana izmjerene tijekom ljeta jeseni 2009. godine

ZAKLJUČAK

Kako prirodni plin na svim ležištima na plinskim poljima u Podravini (Molve, Kalinovac, Stari Gradec i Gola duboka) sadrži štetne primjese kao što su ugljikov dioksid, sumporovodik, živa i merkaptani, tako je početkom eksploatacije prirodnog plina dolazilo do štetnog utjecaja tih plinova na okoliš. Postupno su poduzimane mjere za uklanjanje štetnih plinova prije njihovog ispuštanja u okoliš. Ugrađeni su adsorberi za uklanjanje žive i LO-CAT postrojenje za uklanjanje sumpornih spojeva. LO-CAT postrojenje nije potpuno uklanjalo sumporne spojeve te je 2007. godine izgrađen uređaj za spaljivanje otpadnih plinova čija se efikasnost još uvijek ocjenjuje.

Mjerenje merkaptana na plinskom polju Molve pokazuje da su tijekom 2005. i 2006. godine koncentracije merkaptana bile visoke i prelazile su GV od 3 µg m^{-3} za dnevni uzorak. Razine koncentracija tijekom razdoblja mjerenja 2007. – 2009. su se smanjile najvjerojatnije zbog izgradnje uređaja za spaljivanje otpadnih plinova.

Slika 6. Brzina apsorbirane doze na lokaciji MOLVE-10 od 2005. do 2009. godine

Mjerenja brzine doze zračenja provode se na području plinskoga polja Molve zbog potrebe praćenja svakog mogućeg tehnološkog povećanja prirodne radioaktivnosti. Rezultati istraživanja pokazuju da radioaktivnost okoliša na plinskom polju Molve tijekom 5 godina praćenja, 2005-2009., nije porasla radom plinskih bušotina. Provedena tehnološka poboljšanja u procesu proizvodnje prirodnog plina, koja su utjecala na smanjenje kemijskih onečišćenja u zraku, nisu utjecala na radioaktivnost okoliša na plinskom polju Molve.

LITERATURA

[1] Moore H B A, Helwig H L, Graul R J. A Spectrophotometric Method for the Determination of Mercaptans in Air. Am Ind Hyg Assoc J 1960;21:466.
[2] Uredba o graničnim vrijednostima onečišćujćih tvari u zraku. Narodne novine 133/2005.
[3] Zakon o zaštiti zraka. Narodne novine 178/2004.
[4] Pravilnik o praćenju kakvoće zraka. Narodne novine 155/2005.
[5] Pravilnik o izmjeni informacija o podacima iz mreža za trajno praćenje kakvoće zraka. Narodne novine 135/2006.

MERCAPTAN AND RADIATION MONITORING AT THE GAS FIELD MOLVE

Vladimira Vađić, Gordana Pehnec and Jadranka Kovač
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
vvadjic@imi.hr

This paper presents the results of mercaptan monitoring at measuring sites MOLVE-9, MOLVE-10, and MOLVE-11 in the area of influence of a central natural gas station Molve from 2005 to 2009.

Measurements were carried out one month in the summer and one month in either autumn, winter, or spring. During the same period, radiation was measured at MOLVE-10 using "ALARA" dosimeters and is expressed here as mean daily dose rate.

Mercaptan levels exceeded the Croatian limit at MOLVE-9 in the winter of 2005, at MOLVE-10 in the summer of 2005, and at MOLVE-11 in the spring and summer of 2006.

In 2007, a waste gas incinerating plant was constructed at the gas field Molve and mercaptan levels dropped within acceptable limits values at all measuring sites.

Throughout the monitoring period exploitation of gas at the plant did not increase environmental radioactivity.

SUMPOROV DIOKSID I IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE U OKOLIŠU PLINSKOG POLJA MOLVE

Mirjana Čačković, Vladimira Vađić, Silva Žužul, Gordana Marović i Jasminka Senčar
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
mcackovic@imi.hr

UVOD

Nalazišta prirodnog plina bogatstvo su svake zemlje koja ih posjeduje. Eksploatacija prirodnog plina iz plinsko-kondenzatnih ležišta u Podravini uz primjenu najsuvremenije tehnologije i materijala te poštivajući stroge svjetske i domaće ekološke zahtjeve, provodi se već 20-tak godina. Prirodni plin iz ležišta "duboke Podravine" pored ugljikovodika u svom sustavu sadrži i niz štetnih primjesa (CO_2, H_2S, RSH, Hg, slojna voda) koje je potrebno izdvojiti i na kraju zbrinuti bez štetnog učinka na okoliš. Iz tog su razloga na području između Virja i Molvi izgrađena energetska postrojenja (CPS Molve I/II/III) na kojima se provodi izdvajanje i odsumporavanje štetnih plinova. Usporedo s eksploatacijom ugljikovodika prati se i stanje okoliša CPS Molve, a samim time i kvaliteta zraka koja se sustavno provodi već niz godina.

U ovom radu prikazani su rezultati mjerenja sumporova dioksida (SO_2) u zraku, kao i mjerenja brzine doze zračenja za razdoblje 2008. – 2010. godine na plinsko-kondenzatnim stanicama MOLVE 9, MOLVE 10, MOLVE 11, MOLVE 12 i centralnoj plinskoj stanici (CPS) plinskog polja Molve.

MATERIJAL I METODE

Mjerna postaja i razdoblje uzorkovanja

Uzorci SO_2 sakupljani su na četiri mjerne postaje i to: M9, M10, M11 i M12 tijekom 2008., 2009. i 2010. godine. U 2010. godini uz postojeće, mjerenja su proširena i na centralnu plinsku stanicu (CPS).

Usporedno s uzorkovanjem SO_2 provedena su i mjerenja brzine doze zračenja na mjernim postajama M9 i M10 tijekom sve tri godine, a u 2010. godini mjerenja su proširena i na postaju CPS. Položaj mjernih postaja prikazan je na Slici 1. Uzorci su sakupljani na svakoj postaji dva puta po 30

dana tijekom svake godine mjerenja, osim za mjerenje brzine doze zračenja u 2010. godini kada su mjerenja provedena samo ujesen.

Dinamika uzorkovanja bila je:

- 2008. godina: proljeće (14.04. – 14.05.), ljeto (23.06. – 23.07.),
- 2009. godina: ljeto (15.06. – 15.07.), jesen (19.10. – 18.11.),
- 2010. godina: ljeto (14.07. – 13.08.), jesen (8.11. – 8.12.).

Slika 1. Položaj mjernih postaja

Sakupljanje i analiza uzoraka

Uzorci SO_2 sakupljani su tijekom 24-satnih razdoblja pomoću "volumetrijskog aparata" [1] prosisavanjem mjerenog volumena zraka kroz apsorpcijsku otopinu vodikovog peroksida, pri čemu se SO_2 oksidira se u sulfatnu kiselinu i u daljnjoj analizi određuje u obliku sulfatnog iona ionskom kromatografijom [2].

Neprekidno mjerenje brzine ekspozicijske doze provedeno je elektroničkim dozimetrima *ALARA* [3]. Uređaj neprekidno mjeri ionizacijske događaje u svojoj okolini i pohranjuje podatke u desetminutnim intervalima. Spremljeni podaci iščitavaju se računalnim programom koji izračunava vrijednosti brzina apsorbiranih doza iz kojih se izračunavaju srednje dnevne vrijednosti.

REZULTATI

Srednje vrijednosti masenih koncentracija SO_2 izmjerene u pojedinom mjernom razdoblju tijekom 2008. godine prikazane su na Slici 2, za 2009. godinu na Slici 3, te za 2010. godinu na Slici 4.

Na Slici 5 prikazano je kretanje srednjih dnevnih vrijednosti brzine apsorbirane doze kao i srednje godišnje vrijednosti brzine apsorbirane doze (ravna linija) u pojedinom razdoblju mjerenja tijekom 2008. – 2010. godine.

Razine masenih koncentracija SO_2 izmjerene na mjernim postajama u okolici plinskog polja Molve tijekom trogodišnjeg razdoblja mjerenja pokazuju značajne sezonske i prostorne razlike ($P < 0,01$, ANOVA).

Iz rezultata je vidljivo da su prosječne sezonske vrijednosti masenih koncentracija SO_2 tijekom trogodišnjeg mjerenja bile: više tijekom proljeća u 2008. godini na svim postajama, osim na postaji M11 za koju je utvrđena

Slika 2. Srednje vrijednosti masenih koncentracija SO_2 izmjerene u pojedinom razdoblju mjerenja tijekom 2008. godine

Slika 3. Srednje vrijednosti masenih koncentracija SO_2 izmjerene u pojedinom razdoblju mjerenja tijekom 2009. godine

Slika 4. Srednje vrijednosti masenih koncentracija SO_2 izmjerene u pojedinom razdoblju mjerenja tijekom 2010. godine

Slika 5. Kretanje dnevnih i srednjih godišnjih vrijednosti (ravna linija) brzine apsorbirane doze u pojedinom razdoblju mjerenja tijekom 2008. – 2010. godine

viša vrijednost u ljeti, u 2009. tijekom jeseni također na svim postajama osim na M11 kada su vrijednosti bile više u ljeti, a u 2010. tijekom ljeta na svim postajama. Srednje mjesečne vrijednosti kretale su se u rasponu od 0,37 µg m^{-3} do 2,74 µg m^{-3}, a najviše vrijednosti za sve mjerne postaje bile su u ljeto 2010. godine i to u rasponu od 1,89 µg m^{-3} (M11) do 2,74 µg m^{-3} (M10).

Tijekom cjelokupnog razdoblja mjerenja srednje dnevne vrijednosti masenih koncentracija SO_2 bile su u rasponu od 0 µg m^{-3} do 9,27 µg m^{-3}. Najviše vrijednosti od 5,13 µg m^{-3} i 9,27 µg m^{-3} izmjerene su na postaji M12 u proljeće 2008. i jesen 2009. dok je u 2010. godini najviša dnevna vrijednost od 5,95 µg m^{-3} izmjerena u ljeto na postaji M10.

Prema Uredbi o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku [4] propisana je granična vrijednost (GV) za SO_2 koja iznosi 50 µg m^{-3} za vrijeme usrednjavanja od jedne godine, dok GV za 24-satni uzorak iznosi 125 µg m^{-3} i ne smije se prekoračiti više od 3 puta tijekom kalendarske godine. Tijekom promatrane tri godine mjerenja GV za 24-satni uzorak nije bila prekoračena.

Rezultati mjerenja brzine apsorbirane doze pokazuju da je srednja vrijednost za postaju M9 za protekle tri godine iznosila (78 ± 10) $nGyh^{-1}$. Takva brzina apsorbirane doze rezultirala bi prosječnim godišnjim doznim opterećenjem od 0,682 mSv. Srednja vrijednost za postaju M10 za protekle tri godine iznosi (92 ± 12) $nGyh^{-1}$. Takva brzina apsorbirane doze rezultirala bi prosječnim godišnjim doznim opterećenjem od 0,806 mSv. Srednja vrijednost brzine apsorbirane doze za postaju CPS izračunata je na temelju jednomjesečne izloženosti i iznosi (78 ± 4) $nGyh^{-1}$. Takva brzina apsorbirane doze rezultirala bi prosječnim godišnjim doznim opterećenjem od 0,686 mSv.

Godišnje dozno opterećenje u Zagrebu (lokacija IMI) za 2008., 2009. i 2010. godinu iznosi 1,045 mSv, 1,051 mSv i 1,043 mSv.

ZAKLJUČAK

Na osnovi rezultata mjerenja masenih koncentracija SO_2 u zraku, kao i mjerenja brzine doze zračenja za razdoblje 2008. – 2010. godine na plinsko-kondenzatnim stanicama MOLVE 9, MOLVE 10, MOLVE 11, MOLVE 12 i centralnoj plinskoj stanici (CPS) plinskog polja Molve može se zaključiti da su razine masenih koncentracija SO_2 bile niske i nisu prelazile vrijednosti propisane Uredbom o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku. S obzirom da se mjerenja brzine doze zračenja na području plinskog polja Molve provode zbog potrebe praćenja mogućeg tehnološkog povećanja prirodne radioaktvinosti, vidljivo je da do toga nije došlo tijekom promatranog razdoblja mjerenja.

LITERATURA

[1] HRN ISO 4219: 1997. Kakvoća zraka – Određivanje plinovitih sumpornih spojeva u vanjskom zraku – Uređaj za sakupljanje uzoraka.

[2] UNEP/WHO, GEMS/AIR Methology Reviews, Vol.4: Passive and Active Sampling Methodologies for Measurement of Air Quality. WHO/EOS/94.4, UNEP/GEMS/94.A.5, UNEP, Nairobi 1994.

[3] Prlić I, Radalj Ž, Cerovac Z, Marović G, Gladić J, Vrtar M, Senčar J. Digital dosimeter – ALARA OD – personal and environmental monitoring system. in: Medizinische Physik, Deutsche Gesellschaft fur Medizinische Physik, Berlin 2001;125.

[4] Uredba o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku. Narodne novine 133/2005.

SULPHUR DIOXIDE AND IONISING RADIATION IN THE ENVIRONMENT OF GAS FIELD MOLVE

Mirjana Čačković, Vladimira Vađić, Silva Žužul, Gordana Marović and Jasminka Senčar
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
mcackovic@imi.hr

This paper presents the results of measurements of sulphur dioxide (SO_2) in the air and ionising radiation in the environment of gas field Molve. Sampling was carried out for three years 2008 – 2010. Samples were collected every year over two months; for thirty days in spring and summer 2008, in and summer and autumn 2009 and 2010. Twenty-four-hour samples of SO_2 were collected at four measuring sites: MOLVE 9, MOLVE 10, MOLVE 11, and MOLVE 12. In 2010 measurements were enlarged at central gas station (CPS). Measurements of ionizing radiation obtained by "ALARA" dosimeters were at sites MOLVE 9, MOLVE 10 and CPS, respectively.

Results show that the levels of SO_2 mass concentrations were low and ranged from 0 $\mu g\ m^{-3}$ to 9.27 $\mu g\ m^{-3}$ for daily based collected samples and did not excess the limit value prescribed by Regulation on Limit Values of Pollutants in Air.

Results obtained by "ALARA" dosimeters were calculated as mean daily absorbed dose rate. Absorbed dose measurements were calculated on yearly base (at MOLVE yearly equivalent dose was 0.682 mSv, at MOLVE 10 it was 0.806 mSv and at CPS it was 0.686 mSv). Results show that ionising radiation in the environment at gas field Molve is not enhanced by gas exploitation at the plant.

RADIOAKTIVNOST NA PLINSKOM POLJU MOLVE

Gina Branica, Gordana Marović i Jasminka Senčar
Jedinica za zaštitu od zračenja,
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
gbranica@imi.hr

UVOD

Zemni ili prirodni plin je fosilno gorivo koje se najvećim dijelom (85 % do 95 %) sastoji od metana (CH_4), koji je najjednostavniji ugljikovodik bez mirisa i okusa. Zapaljiv je i eksplozivan. Preostali udio (5 % do 15 %) su složeniji ugljikovodici s najvećim udjelom etana (> 90 %). U manjim količinama prisutni su ostali ugljikovodici, te ugljični dioksid (CO_2) i dušik (N_2), a moguća je i pojava sumpornog dioksida, živinih i drugih para. Uz navedene primjese prisutna je određena količina radioaktivnih elemenata. Porijeklo, vrsta i udio tih primjesa ovise o vrsti matičnih stijena u podzemnim nalazištima prirodnog plina.

Najveći izvor zemnog plina u Republici Hrvatskoj se nalazi u Molvama, gdje se proizvodi čak 70 % plina za RH. Tamo je najmoderniji pogon za vađenje, prerađivanje i distribuciju plina u ovom dijelu Europe. Zbog sigurnosti rada samih procesnih postrojenja i zadovoljenja kvalitete izlaznog proizvoda, potrebno je izdvojiti primjese i zbrinut ih bez štetnog utjecaja na zdravlje ljudi i okoliš.

Suradnici Jedinice za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada (IMI) iz Zagreba sustavno provode mjerenja radioaktivnosti na plinskom polju Molve u sklopu projekta "Monitoring okoliša CPS Molve" [1,2] od 2001. godine. U ovom radu prikazan je dio tih istraživanja, a odnosi se na gamaspektrometrijska mjerenja provedena tijekom 2009. i 2010. godine.

MATERIJAL I METODE

Lokacije mjerenja odabrane su u suradnji Jedinice za zaštitu od zračenja IMI, "Naftaplina" iz Zagreba i Zavoda za javno zdravstvo Koprivničko-križevačke županije. Lokacije su: centralna plinska stanica (CPS), aktivna plinska bušotina (M-9) i zatvorena plinska bušotina (M-10) (Slika 1). Metode mjerenja koje se provode na terenu obuhvaćaju *in situ* gamaspektrometrijska mjerenja i neprekidna mjerenja ekspozicijske doze zračenja.

Slika 1. Položaj mjernih postaja

In situ gamaspektrometrijska mjerenja provode se za utvrđivanje izvora osnovnog zračenja: kozmičkog, terestrijalnog i umjetnih izvora radioaktivnosti (proizvoda ljudske aktivnosti) neposrednim mjerenjima na terenu pomoću poluvodičkog detektora (germanij visoke čistoće – HPGe) sljedećih karakteristika: rezolucija na 1,33 MeV ^{60}Co je 1,75 keV; relativna efikasnost na 1,33 MeV ^{60}Co iznosi 21 %. *In situ* gamaspektrometrijska mjerenja u trajanju od tisuću sekundi provedena su tijekom obilaska na lokacijama CPS, M-9 i M-10. Slika 2 prikazuje gama spektar snimljen na lokaciji M-9.

Uzorci mahovine uzeti su na lokaciji aktivne plinske bušotine (M-9) 2009. godine. Priprema uzorka za mjerenje provela se sušenjem u sušioniku na 105 ºC. Radioaktivnost uzoraka izmjerena je visokorezolucijskom gama-spektrometrijom u laboratoriju. Kalibracija efikasnosti načinjena je standardima Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) i Svjetske zdravstvene organizacije (WHO). Na Slici 3 prikazan je gama spektar uzorka mahovine.

REZULTATI I RASPRAVA

Iz *in situ* gamaspektrometrijskih mjerenja izračunate su koncentracije prirodnih radionuklida u tlu, uz pretpostavku njihove jednolike raspodjele u tlu. Izračunati su doprinosi apsorbiranoj dozi nađenih radionuklida iz pojedinog prirodnog radioaktivnog niza, kao i prirodnog kalija. Kako je ustanovljen i ^{137}Cs, za izračun njegovog doprinosa apsorbiranoj dozi, pretpostavila se površinska raspodjela uz eksponencijalnu penetraciju u dubinu tla.

Slika 2. *In situ* gama spektar snimljen na lokaciji M-9

Slika 3. Gama spektar uzorka mahovine

Analizom dobivenih spektara, iz intregralnog broja impulsa pri svakom mjerenju određena je brzina ekspozicijske doze (X u C kg^{-1} h^{-1}), a iz nje je izračunata brzina apsorbirane doze (D u nGy h^{-1}) kao i doprinos ^{137}Cs ukupnoj brzini doze (naveden u zagradama) (Tablica 1). U Tablici 2 su prikazani rezultati površinske koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u istom razdoblju (2009. i 2010. godina).

Tablica 1. Brzine apsorbirane doze D/ nGy h^{-1} na pojedinim lokacijama i doprinos ^{137}Cs ukupnoj brzini doze

	2009.		**2010.**	
LOKACIJA	***D*** nGy h^{-1}	**doprinos ^{137}Cs**	***D*** nGy h^{-1}	**doprinos ^{137}Cs**
MOLVE CPS	89 ± 6	1 %	97 ± 10	1 %
MOLVE M-9	72 ± 5	8 %	78 ± 9	7 %
MOLVE M-10	66 ± 6	8 %	87 ± 9	3 %

Tablica 2. Koncentracija površinske aktivnosti ^{137}Cs

	2009.	**2010.**
LOKACIJA	***A***/ Bq m^{-2}	
MOLVE CPS	305 ± 36	311 ± 40
MOLVE M-9	2379 ± 86	2165 ± 82
MOLVE M-10	1138 ± 61	930 ± 56

U spektrima izmjerenim 2009. i 2010. godine detektiran je ^{7}Be, prirodni i kozmogeni radionuklid. Njegova je koncentracija aktivnosti 2009. iznosila od 162 ± 31 Bq m^{-2} na lokaciji CPS do (195 ± 34) Bq m^{-2} na M-10, a 2010. od (192 ± 35) Bq m^{-2} na M-9 do (334 ± 44) Bq m^{-2} na lokaciji CPS. Koncentracija površinske aktivnosti ^{137}Cs 2009. na bušotini M-9 bila je (2379 ± 86) Bq m^{-2}, a na M-10 je (1138 ± 61) Bq m^{-2}, što su vrijednosti višestruko veće od površinske aktivnosti na CPS, (305 ± 36) Bq m^{-2}. Godinu dana kasnije površinska aktivnost ^{137}Cs bila je nešto manja (Tablica 2).

Jedan od najznačajnijih skupljača radionuklida iz zraka su mahovine koje akumuliraju radionuklide iz okoliša učinkovitije od druge vegetacije [3]. Iz zemlje gotovo ne resorbiraju fisijske produkte, ili u količinama koje su zamemarive. Glavni sadržaj fisijskih radionuklida je u gornjim zelenim dijelovima biljke i procjenjuje se da je akumulacija radionuklida proporcionalna unosu. Zato smo uzeli i izmjerili uzorak mahovine s aktivne bušotine M-9 2009. godine, gdje je *in situ* mjerenje pokazalo nešto veću koncentraciju aktivnosti ^{7}Be i ^{137}Cs. Izmjerene i izračunate vrijednosti koncentracije aktivnosti u mahovini bile su uz vremensku korekciju za ^{7}Be (946 ± 23) Bq kg^{-1}, a za ^{137}Cs (23,3 ± 0,8) Bq kg^{-1}. Navedene nešto povećane vrijednosti površinske i koncentracijske aktivnosti ^{137}Cs nisu posljedica rada plinskog polja, budući da se radi o fisijskom radionuklidu prisutnom u okolišu još od vremena prvih nuklearnih pokusa, a naglašeno poslije nesreća na nuklearnim postrojenjima, kao ni više vrijednosti površinske i koncentracijske aktivnosti kozmogenog ^{7}Be.

ZAKLJUČAK

Terestrijalni i kozmogeni radionuklidi prisutni u okolišu na prostorima bušotina plinskog polja Molve izmjereni su u koncentracijama koje iz godine u godinu doprinose apsorbiranoj brzini doze u bliskim izmjerenim vrijednostima.

Rezultati istraživanja pokazuju da radioaktivnost okoliša na plinskom polju Molve nije povećana radom plinskih bušotina, no zbog primjećenih varijacija nužno je učestalije pratiti stanje radioaktivne kontaminacije.

ZAHVALA

Ovaj rad ostvaren je u sklopu projekata financiranih od Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske, Radioaktivnost okoliša i zaštita od zračenja i Radioekologija mora i priobalja. Autori zahvaljuju Ljerki Petroci na pomoći.

LITERATURA

[1] IMI-P-248. Rezultati mjerenja radioaktivnosti plinskog polja Molve. Izvještaj za 2009. godinu. Zagreb, 2009.

[2] IMI-P-272. Rezultati mjerenja radioaktivnosti plinskog polja Molve. Izvještaj za 2010. godinu. Zagreb, 2010.

[3] Marović G. The role of bioindicators in assessing radioactive contamination. Arh hig rada toksikol 1990;41:371-378.

RADIOACTIVITY AT NATURAL GAS FIELD MOLVE

Gina Branica, Gordana Marović and Jasminka Senčar
Radiation Protection Unitl Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
gbranica@imi.hr

Natural gas is an extremely important source of energy, especially in Republic of Croatia being used one third over other sources of energy.

Natural gas is composed primarily of the methane, but it also contains small amounts of radioactive elements. The process of getting natural gas from underground wells to the end users has the potential for being environmentally destructive, and can potentially have harmful impact on environment and population living nearby.

This study was carried out at natural gas field at Molve by the Radiation Protection Unit of Institute for Medical Research from Zagreb, as the part of monitoring program "Monitoring of the environment of CPS Molve". The results of gamma spectroscopy measurements of ^{137}Cs activities in mosses and soil for two years period (2009 and 2010) are summarized in this paper.

ANTROPOGENI RADIONUKLIDI U MORSKOJ VODI SREDNJEG I JUŽNOG JADRANA

Dijana Pavičić-Hamer
Centar za istraživanje mora, Institut Ruđer Bošković, Rovinj
pavicic-hamer@cim.irb.hr

UVOD

Zbog geomorfoloških karakteristika Jadransko more je potencijalno osjetljivije na onečišćenje od ostatka Sredozemnog mora, uključujući i antropogene radionuklide [1]. Glavni izvori dotoka antropogenih radionuklida u Jadransko more su atmosfersko onečišćenje radionuklidima (fallout) i donos rijekom Po [2,3]. Najviše istraživani radionuklidi u Jadranskom moru su ^{137}Cs i ^{90}Sr, pogotovo nakon Černobilske nesreće 1986. godine [3-5]. Distribucija transuranskih radionuklida ^{238}Pu, ^{239,240}Pu i ^{241}Am je nedostatno istraživana, prvenstveno zbog niskih koncentracija u okolišu i složenosti radiokemijskih postupaka za njihovo određivanje. Stoga su u ovom istraživanju obuhvaćeni radionuklidi ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239,240}Pu i ^{241}Am u vodenom stupcu Jabučke i Južnojadranske kotline te površinske vode ulazne i izlazne struje u Otrantu.

MATERIJAL I METODE

U sklopu projekta IAEA TC RER/7/003 "Marine Environmental Assessment of the Mediterranean Sea" organizirano je Međunarodno znanstveno krstarenje po Jadranskom i Jonskom moru 2007. godine. Krstarenje je organizirano istraživačkim brodom "Palagruža" Hrvatskoga hidrografskog instituta uz sudjelovanje 30 znanstvenika iz IAEA, Albanije, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Grčke, Hrvatske, Malte i Slovenije. Mjerne postaje su bile u Jadranu i Jonskom moru (Slika 1).

U IAEA laboratoriju u Monaku 2009. godine analizirane su površinske vode u ulaznoj i izlaznoj struji Otranta, te vodeni vertikalni profil Jabučke (5 m, 50 m, 130 m i 200 m) i Južnojadranske (5 m, 100 m, 500 m i 850 m) kotline. Napravljena je radiokemija uzoraka uz postupnu ekstrakciju ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239,240}Pu i ^{241}Am koji su izmjereni alfa, beta i gama spektrometrijom prema standardnom postupku IAEA [7].

Slika 1. Mjerne postaje analizirane morske vode: Jabučka kotlina AD02, Južnojadranska kotlina AD05, Otrant ulaz AD11 i izlaz AD10.

REZULTATI I RASPRAVA

Podaci o radioaktivnosti u Jadranu su prilično nedostatni, osim za aktivnosti ^{137}Cs i ^{90}Sr [2-5]. Cilj ovog istraživanja je određivanje distribucije radionuklida ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239,240}Pu i ^{241}Am u Jadranu. Nakon Černobilske nesreće koncentracije ^{137}Cs u Jadranu povećane su za 2 reda veličine, a već 1990. koncentracije ^{137}Cs su bile u nivou višegodišnjeg prosjeka prije Černobilske nesreće [3, 4]. U istraživanoj morskoj vodi Jadrana prosječna koncentracija ^{137}Cs je 2,2 mBq/L.

Konvekcijski procesi koji prenose površinske radionuklide u dublje slojeve događaju se na mjestima gdje se formira duboka voda. Jedno od takvih mjesta je sjeverni Jadran gdje se formira sjevernojadranska gusta voda (NAdDW), a drugo Južnojadranska kotlina u kojoj duboka voda nastaje tonjenjem vode u središtu ciklonalnog vrtloga (ADW). NAdDW struji prema jugu, zadržava se u najdubljim slojevima Jabučke kotline, a dijelom sudjeluje u formiranju ADW. Duboka voda Jadrana se giba u pridnenim slojevima Otrantskih vrata prema dubokim slojevima istočnog Sredozemlja (EMDW) [1].

Slika 2. Vertikalni profili ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239,240}Pu i ^{241}Am Jabučke i Južnojadranske kotline

Tablica 1. Koncentracije aktivnosti ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239,240}Pu i ^{241}Am u površinskom sloju ulazne i izlazne struje vode u Otrantu

Radionuklid	**Otrant ulaz AD11**	**Otrant izlaz AD10**
^{137}Cs (mBq/L)	2,10	2,54
^{90}Sr (mBq/L)	1,27	1,37
^{137}Cs:^{90}Sr	1,66	1,86
^{239,240}Pu (µBq/L)	10,19	7,40
^{238}Pu (µBq/L)	0,68	0,62
^{238}Pu:^{239,240}Pu	0,07	0,08
^{241}Am (µBq/L)	0,53	0,44

Zbog prisutnosti NAdDW u pridnenom sloju Jabučke kotline dolazi do porasta koncentracije ^{137}Cs u vodenom stupcu (Slika 2). U Južnojadranskoj kotlini koncentracije ^{137}Cs su izjednačene ispod 100 m dubine do dna, gdje se formira ADW. Koncentracije ^{90}Sr u Jadranskom moru smanjuju se eksponencijalno od 1963. do 2003. godine sa 14,8 na 2,0 mBq/L [4, 8]. U istraživanoj morskoj vodi Jadrana srednja aktivnost ^{90}Sr je 1,37 mBq/L, što potvrđuje da aktivnost ^{90}Sr u Jadranu opada s vremenom. Istraživani vertikalni profili ^{137}Cs i ^{90}Sr pokazuju sličnu distribuciju, koncentracije ^{137}Cs veće su za faktor 1,6 koji predstavlja tipičan omjer tih radionuklida od globalnog fallouta (Slika 2) [5,6].

Tonjenje i dinamika čestica u vodenom stupcu je glavni mehanizam distribucije transuranskih radionuklida u vertikalnom profilu [9]. U površinskoj vodi Jadrana koncentracije $^{239,240}Pu$ su između 7,4 i 10,3 μBq/L. U Jabučkoj kotlini zbog prisutnosti NAdDW u pridnenom sloju dolazi do porasta koncentracije $^{239,240}Pu$ na 12,23 μBq/L, a zbog konvekcijskih procesa u Južnojadranskoj kotlini na 19,3 μBq/L. Koncentracije ^{238}Pu (0,55 μBq/L) i ^{241}Am (0,61 μBq/L) su veoma niske u Jadranu, prvenstveno zbog nedostatka lokalnih izvora. Vertikalni profili ^{241}Am pokazuju povećanje koncentracije s dubinom, u Južnojadranskoj kotlini od 0,22 do 0,68 μBq/L, a u Jabučkoj kotlini od 0,48 do 0,76 μBq/L (Slika 2).

Otrant povezuje Jadran sa Sredozemnim morem. Ulaznom strujom uz istočnu obalu dolazi voda iz Sredozemlja, a izlaznom strujom uz zapadnu obalu izlazi voda iz Jadrana [1]. U izlaznoj struji Otranta koncentracija ^{137}Cs je viša od koncentracije u ulaznoj struji, što pokazuje da je u Jadranu nešto viša koncentracija ^{137}Cs od globalnog fallouta nego u Sredozemnom moru. Obrnuto je za koncentraciju $^{239,240}Pu$, što pokazuje da je veći donos $^{239,240}Pu$ u Jadran iz Sredozemnog mora. Nema značajne razlike u koncentraciji ^{90}Sr i ^{241}Am u Otrantu (Tablica 1).

Tablica 2. Srednje koncentracije radionuklida u površinskoj vodi Sredozemnog (2005) i Jadranskog mora (2007)

Radionuklid	**koncentracija** (mBq/L)	
	Sredozemno more	**Jadransko more**
^{137}Cs	2,6	2,2
^{90}Sr	1,7	1,37
$^{239,240}Pu$	0,012	0,011
^{238}Pu	0,002	0,001
^{241}Am	0,002	0,001

Vrijeme evolucije, razine i inventar umjetnih radionuklida, prvenstveno ^{137}Cs, dobro su istraženi u Sredozemnom moru [5,6,9]. Srednje koncentracije radionuklida u istraživanoj morskoj vodi Jadrana su usporedive s vrijednostima u Sredozemnom moru (Tablica 2) [6].

ZAKLJUČAK

Koncentracije ^{137}Cs i ^{90}Sr od globalnog fallouta su u Jadranskom moru niske, a omjer ^{137}Cs:^{90}Sr je 1,6. U Jabučkoj i Južnojadranskoj kotlini vertikalni profili radionuklida su različiti zbog različitog porijekla duboke vode. U ovom radu prikazani su prvi rezultati mjerenja transuranskih radionuklida u Jadranskom moru. Koncentracije aktivnosti $^{239,240}Pu$, ^{238}Pu i ^{241}Am su veoma niske u Jadranu zbog nedostatka lokalnih izvora. Najviši donos $^{239,240}Pu$ u Jadran je iz Sredozemnog mora. U izlaznoj struji Otranta je viša koncentracija ^{137}Cs, što pokazuje da je u Jadranu nešto viša koncentracija ^{137}Cs od globalnog fallouta nego u Jonskom moru. Prosječne koncentracije radionuklida u Jadranskom moru usporedive su s vrijednostima za Sredozemno more. Rezultati radioaktivne kontaminacije se mogu primijeniti u procjeni stanja okoliša te zaštiti Jadranskog mora.

LITERATURA

[1] Cushman-Roisin B, Gačić M, Poulain PM, Artegiani A. Physical Oceanography of the Adriatic Sea. Kluwer Academic Publishers, 2001. ISBN 1-4020-0225-4.

[2] Triulzi C, Tassi Pelati L, Albertazzi S. Radionuclides present in North Adriatic Sea in front of Po delta (1979-81). Rapp Comm Int Expl Mer Med 1983;28:229-237.

[3] Nonnis Marzano F, Triulzi C. A Radioecological Survey of Northern and Middle Adriatic Sea before and After the Chernobyl Event (1979-90). Mar Pollut Bull 1994;28(4):244-253.

[4] Franić Z, Bauman A. Radioactive contamination of the Adriatic Sea by ^{90}Sr and ^{137}Cs. Health Phys 1993;64(2):162-169.

[5] Papucci C, Delfanti R. $^{137}Caesium$ distribution in the Eastern Mediterranean Sea: recent changes and future trends. Sci Tot Environ 1999;237/238:67-75.

[6] IAEA-TECDOC-1429. Worldwide marine radioactivity studies (WOMARS) Radionuclide levels in oceans and seas. IAEA, 2005.

[7] IAEA TCP RER/7/003. Marine Environmental Assessment of the Mediterranean Region. Methodological guidelines.

[8] Franić Z. Estimation of the Adriatic Sea water turnover time using fallout ^{90}Sr as a radioactive tracer. J Marine Syst 2005;57:1-12.

[9] Delfanti R, Papucci C. Mediterranean Sea. (in preparation)

ANTHROPOGENIC RADIONUCLIDES IN SEAWATER OF THE MIDDLE AND SOUTHERN ADRIATIC SEA

Dijana Pavičić-Hamer
Center for Marine Research, Ruđer Bošković Institute, Rovinj, Croatia
pavicic-hamer@cim.irb.hr

In the past few decades, the most studied radioisotopes in the Adriatic Sea have been Cs^{137} and Sr^{90}, especially after the Chernobyl accident in 1986. On the contrary, the distribution of transuranic radionuclides in general in seawater of the Adriatic Sea is insufficiently explored due to low concentrations, absence of significant local sources and cumbersome radiochemical procedures for their determination. As a part of TC Project (RER/7/003) "Marine Environmental Assessment of the Mediterranean Sea" carried out by the IAEA, the International Scientific Cruise to the Adriatic and Ionian Seas was conducted in 2007. Samples of seawater collected during the scientific cruise were analyzed in the IAEA Marine Environment Laboratories in Monaco in 2009. The anthropogenic radionuclides ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am and $^{239,240}Pu$ were chosen as the most representative of anthropogenic radioactivity in the marine environment, comprising beta-, gamma- and alpha-emitters which have the highest potential contribution to radiation doses to humans via seafood consumption.

This paper presents the results of the radionuclides distribution and behavior in the water column in the Jabuka Pit and South Adriatic Pit, and in the surface water of the inflowing and outflowing vein of the Otranto Strait. The vertical radionuclide profiles are different in the Jabuka Pit and South Adriatic Pit due to the different origin of dense water formation. In this report the first measured data for $^{239,240}Pu$ and ^{241}Am activity concentrations in the Adriatic Sea are presented. From the Adriatic cruise the average concentrations of the radionuclides in seawater are comparable to the literature data for the values of the Mediterranean Sea. The knowledge of radioactive contamination could be used for estimation of the environment condition and protection of the Adriatic Sea.

TRICIJ U OBORINAMA, POVRŠINSKIM I PODZEMNIM VODAMA NA PODRUČJU ZAGREBA

Nada Horvatinčić, Jadranka Barešić, Andreja Sironić, Ines Krajcar Bronić i Bogomil Obelić
Institut Ruđer Bošković, Zagreb
nada.horvatincic@irb.hr

UVOD

Mjerenja radioaktivnog izotopa tricija (^3H) i stabilnih izotopa vodika ($^2H/^1H$) i kisika ($^{18}O/^{16}O$) koji su sastavni dio molekule vode, mogu dati korisne informacije kod hidrogeoloških studija u svrhu praćenja miješanja površinskih i podzemnih voda, brzine cirkulacije vode u prirodi, posebno u krškim područjima gdje je izmjena površinske i podzemne vode relativno brza, te kod određivanja srednjeg vremena zadržavanja vode u podzemlju. Povišene koncentracije aktivnosti ^3H u prirodnim vodama mogu ukazivati i na određene kontaminacije, kao što je bilo značajno povišenje ^3H u atmosferi, odnosno oborinama, uslijed termonuklearnih eksplozija šezdesetih godina prošlog stoljeća [1], dok povišene koncentracije ^3H u površinskim i podzemnim vodama mogu biti posljedica većih ispusta iz nuklearnih elektrana.

Koncentracije ^3H te stabilnih izotopa $^2H/^1H$ i $^{18}O/^{16}O$ u oborinama na području Zagreba prate se mjesečno od 1979. godine, a rezultati stanice Zagreb – Grič su uključeni u bazu podataka GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) [2] preko Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA). Početkom 2010. godine započelo se s mjerenjima izotopa u rijeci Savi u Zagrebu te u podzemnoj vodi s područja vodocrpilišta Petruševec, koje se koristi za eksploataciju pitke vode. Mjerenja su uključena u Regionalni IAEA projekt RER/8/016 *Using Environmental Isotopes for Evaluation of Streamwater/Groundwater Interactions in Selected Aquifers in the Danube Basin* u kojem sudjeluje 6 podunavskih zemalja. Svrha projekta je praćenje utjecaja riječnih/površinskih voda na podzemne rezervoare voda u području Dunava i njegovih pritoka.

MATERIJAL I METODE

U okviru projekta RER/8/016, a u dogovoru sa suradnicima iz "Vodoopskrbe i odvodnje" te uz suglasnost "Hrvatskih voda" započelo je

uzorkovanje voda s vodocrpilišta na području Petruševca, kao područja pogodnog za praćenje utjecaja infiltrirane savske vode na podzemne vode tog vodonosnika. Za uzorkovanje vode odabrana su 3 piezometara s oznakama PP23/5, PP18/30 i PP19, te bunar oznake B-5A. Podaci o piezometrima i bunaru te o dinamici uzorkovanja voda za izotopne analize nalaze se u Tablici 1.

Tablica 1. Podaci o uzorkovanju voda

Lokacija	**Udaljenost od Save** (m)	**Dubina** (m)	**Analize i uzorkovanje**
Sava, Zagreb, ispod Domovinskog mosta			^{3}H – mjesečno $^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$ – tjedno
Oborine, Zagreb-Grič			^{3}H, $^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$ – mjesečne oborine
Bunar B-5A, Petruševec	400	38,0	^{3}H, $^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$ – mjesečno
Piezometar PP23/5 Petruševec	200	16,4	^{3}H, $^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$ – mjesečno
Piezometar PP18/30 Petruševec	500	32,0	^{3}H, $^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$ – mjesečno
Piezometar PP19, Petruševec	500	41,6	^{3}H, $^{2}H/^{1}H$, $^{18}O/^{16}O$ – mjesečno

U ovom radu bit će prikazani samo rezultati mjerenja ^{3}H aktivnosti. Mjerenja stabilnih izotopa rade se u Institutu za geokemijska istraživanja, Budimpešta, u okviru suradnje na projektu RER/8/016, a ti će se rezultati, zajedno s ^{3}H aktivnostima, koristiti za daljnja hidrogeološka modeliranja.

Mjerenja ^{3}H aktivnosti u uzorcima voda radila su se tekućinskim scintilacijskim brojačem *Quantulus 1220* [3]. Zbog očekivano niskih koncentracija aktivnosti ^{3}H, svi uzorci vode prethodno su podvrgnuti postupku elektrolitičkog obogaćenja. Elektroliza se provodi na uređaju koji se sastoji od 20 elektrolitičkih ćelija, a postupkom elektrolize iz 500 mL uzorka vode dobije se volumen vode od (19 ± 1) mL uz faktor obogaćenja (22,5 ± 0,5) [4]. Granica detekcije je od 0,3 TU do 0,5 TU [3,4]. Koncentracija aktivnosti ^{3}H se izražava u tricijevim jedinicama, TU (*Tritium unit*): $^{3}H/^{1}H = 10^{-18}$, 1 TU = 0,118 Bq/L.

REZULTATI

Rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti ^3H u mjesečnim oborinama, rijeci Savi, te na području vodocrpilišta Petruševec tijekom 2010. godine, prikazani su na Slici 1.

Slika 1. Koncentracija aktivnosti tricija u mjesečnim oborinama, rijeci Savi i podzemnoj vodi iz vodonosnika na području Petruševca (piezometri PP23/5, PP18/30, PP19, bunar B-5A) u 2010. godini.

Koncentracija aktivnosti ^3H u oborinama pokazuje blagi porast u ljetnim mjesecima (14 TU), te niže vrijednosti u zimskim mjesecima, (4 – 6) TU, što je karakteristično za kontinentalne oborine. Koncentracije aktivnosti ^3H u rijeci Savi te u podzemnoj vodi na 3 piezometara i jednom bunaru pokazuju vrlo slične vrijednosti u razdoblju od siječnja do travnja 2010. Savska voda ima gotovo identične ^3H vrijednost kao oborine (~6 TU), dok su koncentracije aktivnosti ^3H u podzemnim vodama više za nekoliko TU i kreću se u rasponu (6 – 13) TU. Nagli porast ^3H aktivnosti u savskoj vodi pojavljuje se u lipnju 2010., (199 ± 20) TU (uzorak sakupljen 4.06.2010.), a već u srpnju ^3H aktivnost se vratila na vrijednost od (6,3 ± 0,8) TU i u idućim mjesecima je na tom nivou.

Porast koncentracije aktivnosti ^3H zamijećen je i u podzemnim vodama vodonosnika Petruševec, ali znatno manje nego u savskoj vodi, te s razlikama između pojedinih piezometara i bunara. Maksimalne vrijednosti od 60 TU zamijećene su na piezometrima PP23/5 i PP18/30, ali s vremenskim zakašnjenjem od 2, odnosno 4 mjeseca u odnosu na rijeku Savu. U vodama piezometra PP19 i bunara B-5A porast ^3H aktivnosti je vrlo postupan bez izraženog maksimuma.

Zabilježene promjene u koncentraciji aktivnosti ^3H u mjerenim vodama uzrokovane su većim ispustom voda obogaćenih tricijem iz Nuklearne elektrane Krško (NEK), i to u 6 navrata u razdoblju od 2.06. do 17.06.2010. (usmeno priopćenje suradnika NEK-a). Porast koncentracije aktivnosti ^3H u savskoj vodi, koji je i najviši, može se pripisati samo ispustima od 2.06. i 3.06.2010., tj. prije 4.06.10. kada je uziman uzorak vode iz Save. Podzemne vode su uzorkovane 28.06.2010. i porast ^3H aktivnosti je posljedica svih 6 ispuštanja iz NEK tijekom lipnja 2010. No, zbog različitog vremena infiltracije savske vode u podzemne vode vodonosnika Petruševec, porast koncentracije aktivnosti ^3H je znatno manje izražen i sa različitim vremenskim odmakom u različitim piezometrima. Za sve lokacije podzemnih voda karakteristično je da su relativno blizu glavnog toga rijeke Save, od 200 do 500 m, s većim razlikama u dubini bušenja (od 16 m do 41,6 m) (Tablica 1). U piezometru PP23/5 koji je najbliži Savi i na najmanjoj dubini, odziv na povišenu ^3H aktivnost je najizraženiji i najbrži, dok je u piezometru PP19 i bunaru B-5A, koji su na najvećoj dubini i nešto udaljeniji od Save, porast ^3H aktivnosti vrlo postupan i slabo izražen.

ZAKLJUČAK

Rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti ^3H u oborinama, rijeci Savi i podzemnim vodama vodonosnika Petruševec, pokazali su sljedeće:

1) Koncentracije aktivnosti ^3H u savskoj vodi i oborinama na području Zagreba gotovo su identične, što pokazuje da je utjecaj oborina na savsku vodu dominantan.
2) Znatan porast koncentracije aktivnosti ^3H u Savi u lipnju 2010. ukazuje na utjecaj ispuštene vode obogaćene tricijem iz NE Krško. Maksimalna koncentracija aktivnosti ^3H zabilježena je 1 – 2 dana nakon ispusta iz NEK u rijeku Savu.

3) Porast koncentracije aktivnosti ^{3}H u podzemnim vodama vodocrpilišta Petruševec znatno je manje izražen, te s različitim vremenskim zakašnjenjem u odnosu na rijeku Savu. Intenzitet i brzina odziva povišene koncentracije aktivnosti ^{3}H u podzemnim vodama u korelaciji je s udaljenosti od Save i dubinom bušotine. To ukazuje na manje razlike u vremenu infiltracije savske vode između pojedinih piezometara i bunara.

4) U ovom slučaju ^{3}H se pokazao kao vrlo dobar obilježivač, te će se rezultati ovih mjerenja, zajedno s rezultatima stabilnih izotopa $^{2}H/^{1}H$ i $^{18}O/^{16}O$, koristiti za daljnja modeliranja u svrhu određivanja vremena infiltracije savske vode u podzemne rezervoare.

Zahvala

Zahvaljujemo suradnicima "Vodoopskrbe i odvodnje", gospođi Branki Jakuš, Miri Mihovec Grdić te gospodinu Mladenu Klemaru, na pomoći kod sakupljanja uzoraka vode i podacima za vodocrpilište Petruševec. Mjerenja su financirana iz IAEA projekta RER/8/016, te projekta Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa 098-0982709-2741.

LITERATURA

[1] Rožanski K, Gonfiantini R, Araguas-Araguas L. Tritium in the global atmosphere: distribution patterns and recent trends. J Phys G: Nucl Part Phys 1991;17:523-536.

[2] IAEA/WMO, Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP database. Accessible at: http://isohis.iaea.org

[3] Barešić J, Horvatinčić N, Krajcar Bronić I, Obelić B. Comparison of two techniques for low-level tritium measurement – gas proportional and liquid scintillation counting. Third European IRPA Congress, Proceedings, Full papers of poster presentations. IRPA (ur.). Helsinki, Finska: IRPA, 2010. P12-21-1 – P12-21-5. http://www.irpa2010europe.com/proceedings/P12.htm

[4] Barešić J, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Obelić B, Sironić A, Kožar-Logar J. Mjerenje tricija u uzorcima voda tekućinskim scintilacijskim brojačem uz elektrolitičko obogaćenje. Ovaj Zbornik.

TRITIUM IN PRECIPITATION, SURFACE AND GROUNDWATERS IN THE ZAGREB AREA

Nada Horvatinčić, Jadranka Barešić, Andreja Sironić, Ines Krajcar Bronić and Bogomil Obelić
Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
nada.horvatincic@irb.hr

Radioactive isotope tritium (^{3}H) and stable isotopes of hydrogen ($^{2}H/^{1}H$) and oxygen ($^{18}O/^{16}O$) were measured in Sava River, precipitation and groundwater at 3 monitoring wells (piezometers) and 1 production well of the Petruševec aquifer, close to the Sava River. Samples were collected monthly during 2010. The investigation is included in the Regional IAEA Project RER/8/016 *Using Environmental Isotopes for Evaluation of Streamwater/Groundwater Interactions in Selected Aquifers in the Danube Basin.* Sava River is a tributary of Danube River and the aim of the investigation is to determine the influence of surface stream of Sava River to the groundwater of aquifer used for water exploitation.

In this work only ^{3}H results were presented. ^{3}H was measured by liquid scintillation counter *Quantulus 1220,* using electrolytic enrichment for all samples.

^{3}H activity in precipitation showed slight seasonal fluctuation between 4 TU and 14 TU, with higher values in summer. ^{3}H activity of Sava River and groundwater of the Petruševec aquifer followed ^{3}H of precipitation till May 2010. Significant increase of ^{3}H in Sava River was observed in June, (199 ± 20) TU, and in the next month it fell down at 6 TU. Increase of ^{3}H was also observed in groundwater but with damped response (maximum 60 TU) and with delay of 2 – 3 months related to Sava River. Different response of different piezometers and the well indicated the different infiltration times of surface water of Sava River to groundwater of the Petruševec aquifer. The increased ^{3}H activity in surface and groundwaters was caused by release of tritiated water from the Krško Nuclear Power Plant, 30 km upstream from Zagreb. The results of ^{3}H, $^{2}H/^{1}H$ and $^{18}O/^{16}O$ measurements will be used to determine the infiltration time of groundwater of the Petruševec aquifer using conceptual and mathematical models.

ODREĐIVANJE ^{210}Pb I ^{210}Po U VODAMA ZA PIĆE DOSTUPNIM NA HRVATSKOM TRŽIŠTU

Matea Rogić[1], Ljudmila Benedik[2], Martina Rožmarić Mačefat[1] i Marko Štrok[2]
[1] Laboratorij za radioekologiju, Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska
[2] Odsek za znanosti o okolju, Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija
mrogic@irb.hr

UVOD

^{210}Pb i ^{210}Po su prirodni radionuklidi i članovi radioaktivnog niza ^{238}U:

$$\boxed{^{238}\mathrm{U}} \rightarrow\rightarrow\rightarrow \underset{22{,}23\ \text{god}}{\boxed{^{210}\mathrm{Pb}}} \xrightarrow{\beta} \underset{5{,}01\ \text{dan}}{\boxed{^{210}\mathrm{Bi}}} \xrightarrow{\beta} \underset{138{,}38\ \text{dana}}{\boxed{^{210}\mathrm{Po}}} \xrightarrow{\alpha} \boxed{^{206}\mathrm{Pb}}\ \text{(stabilno)}$$

Od svih prirodnih radionuklida ^{210}Pb i ^{210}Po su najviše radiotoksični i imaju izrazito visok dozni faktor te, iako su u vodi prisutni u niskim koncentracijama aktivnosti, značajno doprinose ukupnoj efektivnoj dozi koju čovjek prima konzumacijom vode za piće. Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) propisala je maksimalnu dozvoljenu koncentraciju aktivnosti ^{210}Pb i ^{210}Po koja u vodi za piće iznosi 0,1 Bq/L [1], dok Europska komisija navodi 0,2 Bq/L za ^{210}Pb te 0,1 Bq/L za ^{210}Po [2]. U Hrvatskoj zasad ne postoji pravilnik koji bi propisivao koncentraciju aktivnosti pojedinog radionuklida koja smije biti prisutna u vodi za piće nego je propisana samo ukupna dozvoljena primljena doza koja iznosi 0,1 mSv/god, te maksimalna koncentracija aktivnosti tricija od 100 Bq/L, koju je potrebno određivati samo kod formiranja novog izvorišta [3].

Zbog procjene radiološkog utjecaja na ljudsko zdravlje nužno je precizno i točno određivanje ^{210}Pb i ^{210}Po uz niske granice detekcije. Stoga je svrha ovog rada njihovo određivanje u komercijalno dostupnim prirodnim izvorskim i mineralnim vodama proizvedenima u Hrvatskoj kako bi se dobio uvid u njihovu radiološku kvalitetu te procijenio udio ^{210}Po u ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi koju odrasla populacija primi od alfa emitera [4].

MATERIJALI I METODE

U radu su analizirani uzorci 12 prirodnih izvorskih i mineralnih voda proizvedenih u Hrvatskoj. Uzorci voda kupljeni su na hrvatskom tržištu i

nije poznato jesu li i kako tretirani prije punjenja u PET ambalažu. Naime, u Hrvatskoj je dozvoljeno odvajanje spojeva željeza uz koje sutaloži većina radionuklida pa je moguće da je njihova koncentracija aktivnosti na izvoru znatno viša u odnosu na koncentraciju aktivnosti u komercijalno dostupnim vodama [3].

^{210}Pb i ^{210}Po određivani su iz istog uzorka vode (9 L) koji je prethodno zakiseljen klorovodičnom kiselinom (2 mL HCl u 1 L uzorka). Zbog određivanja kemijskog iskorištenja radiokemijskog odjeljivanja uzorku je dodana poznata specifična aktivnost nosača ^{209}Po ((0,3247 ± 0,0062) Bq/g, Eckert & Ziegler) i poznata koncentracija Pb^{2+} (10 mg/cm^3, Merck). Radionuklidi od interesa ukoncentrirani su taloženjem MnO_2, a dobiveni talog je centrifugiran, ispran do neutralnog i otopljen u 2 M HCl kako bi se dobio uzorak pogodan za odjeljivanje polonija i olova na Sr smoli [5,6], koja je prethodno kondicionirana propuštanjem 2 M HCl, a nakon propuštanja uzorka smetajući elementi eluirani su istom kiselinom. Polonij je eluiran s kolone pomoću 6 M HNO_3, a olovo pomoću 6 M HCl. Eluati su upareni do suha (polonij je hlapljiv pa temperatura uparavanja ne smije prijeći 90 °C). Izvor ^{210}Po pripremljen je iz otopine HCl (pH 1 – 2) uz dodatak askorbinske kiseline samodepozicijom na srebrnoj pločici. Po završetku samodepozicije pločica je isprana i sušena na zraku. Izvor za brojanje ^{210}Pb pripremljen je taloženjem $PbSO_4$ iz vodene otopine dodatkom koncentrirane H_2SO_4. Talog je prebačen u planšetu za brojanje, osušen na zraku i ostavljen 14 dana da se uspostavi ravnoteža ^{210}Pb – ^{210}Bi. Kemijsko iskorištenje odjeljivanja olova određeno je gravimetrijski.

Za mjerenje aktivnosti ^{210}Po i ^{209}Po korišten je alfa spektrometar (Alpha Analyst, Canberra) s PIPS poluvodičkim detektorom aktivne površine 450 mm^2 i efikasnošću 28 % (IJS). Obrada spektara vršena je u Genie-2000 software-u. Vrijeme brojanja variralo je od 4 do 8 dana ovisno o koncentraciji aktivnosti ^{210}Po u uzorku. Za mjerenje ^{210}Bi, radionuklida potomka ^{210}Pb, korišten je proporcionalni brojač (TENNELEC LB4100-W).

REZULTATI

Kao što je već spomenuto, analizirani su uzorci prirodnih izvorskih i mineralnih voda proizvedeni i komercijalno dostupni u Hrvatskoj, a lokacije izvora analiziranih voda prikazane su na Slici 1.

Slika 1. Geografski položaj izvora analiziranih prirodnih izvorskih i mineralnih voda

Koncentracija aktivnosti ^{210}Po računata je prema jednadžbi 1:

$$A(^{210}\mathrm{Po}) = \frac{P(^{210}\mathrm{Po}) \times m(^{209}\mathrm{Po}) \times A(^{209}\mathrm{Po})}{P(^{209}\mathrm{Po}) \times V} \qquad (1)$$

gdje je: $P(^{209}\mathrm{Po})$ – neto površina fotovrha ^{209}Po, $P(^{210}\mathrm{Po})$ – neto površina fotovrha ^{210}Po, $m(^{209}\mathrm{Po})$ – masa nosača ^{209}Po (g), $A(^{209}\mathrm{Po})$ – specifična aktivnost ^{209}Po (Bq/g), V – volumen uzorka (L)

Koncentracija aktivnosti ^{210}Pb računata je prema jednadžbi 2:

$$A(^{210}\mathrm{Pb}) = \frac{R(^{210}\mathrm{Bi})}{\eta(chem) \times \eta(\mathrm{det.}) \times 60 \times (1 - e^{-\lambda t}) \times V} \qquad (2)$$

gdje je: $R(^{210}\mathrm{Bi})$ – ukupan broj impulsa, $\eta(chem)$ – iskorištenje radiokemijskog odjeljivanja olova, $\eta(\mathrm{det.})$ – efikasnost detekcije, λ - konstanta radioaktivnog raspada (h^{-1}), t – vrijeme proteklo od odjeljivanja olova do trenutka mjerenja (h), V – volumen uzorka (L).

Iz dobivenih rezultata koncentracija aktivnosti ^{210}Pb i ^{210}Po, koji su prikazani u Tablici 1, vidljivo je da su svi znatno niži od maksimalno dozvoljenih (< 0,1 Bq/L). Raspon koncentracija aktivnosti ^{210}Pb kreće se od 0,7 mBq/L u uzorku MV3 do 7,6 mBq/L u uzorku IV9, dok srednja vrijednost iznosi 3,4 mBq/L. Vrijednosti koncentracije aktivnosti ^{210}Po kreću se od 0,25 mBq/L u uzorku MV3 do 3,0 mBq/L u uzorku IV8, dok srednja vrijednost iznosi 1,1 Bq/L. Moguće je uočiti da nema značajne razlike u koncentracijama aktivnosti navedenih radionuklida u prirodnoj izvorskoj ili mineralnoj vodi te ukoliko se rezultati usporede s drugim studijama prirodnih izvorskih i mineralnih voda vidljivo je da je njihova koncentracija u hrvatskim komercijalnim vodama znatno niža ili jednaka [7,8].

*Tablica 1. K*oncentracije aktivnosti ^{210}Pb i ^{210}Po u hrvatskim komercijalno dostupnim prirodnim izvorskim i mineralnim vodama s izraženom proširenom mjernom nesigurnošću (k = 2)

		A / mBq/L	
Oznaka uzorka	**Tip uzorka**	**^{210}Pb**	**^{210}Po**
IV1	Prirodna izvorska voda	1,7 ± 0,6	0,8 ± 0,1
IV2		3,6 ± 1,2	2,3 ± 0,3
IV3		0,8 ± 0,6	0,6 ± 0,1
IV4		1,1 ± 0,4	0,51 ± 0,04
IV5		2,0 ± 0,7	0,9 ± 0,3
IV6		6,8 ± 0,6	2,1 ± 0,2
IV7		3,1 ± 1,2	0,6 ± 0,1
IV8		7,2 ± 0,9	3,0 ± 0,6
IV9		7,6 ± 0,7	1,1 ± 0,3
MV1	Mineralna voda	2,7 ± 0,6	0,7 ± 0,1
MV2		2,2 ± 1,3	0,7 ± 0,1
MV3		0,7 ± 0,3	0,25 ± 0,03

ZAKLJUČAK

^{210}Pb i ^{210}Po prisutni su u vodama u vrlo niskim koncentracijama aktivnosti, a metodologija njihovog određivanja prije same detekcije zahtijeva ukoncentriravanje iz uzorka i radiokemijsko odjeljivanje, što postupak čini složenim i dugotrajnim. Zbog visoke radiotoksičnosti te mogućeg radiološkog utjecaja na ljudsko zdravlje, određivanje navedenih radionuklida je nužno. Rezultati dobiveni u ovom radu ukazuju da su koncentracije aktivnosti ^{210}Pb i ^{210}Po u svim ispitivanim vodama znatno niže od dozvoljenih vrijednosti [1,2] i poslužit će za izračun ukupne godišnje efektivne doze koju konzumacijom vode primi odrasla osoba [4].

ZAHVALA

Rad je financiran sredstvima Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske (bilateralni projekt "Radiokemijske metode za određivanje radionuklida u uzorcima vode") i Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije (bilateralni projekt BI-HR/10-11-007).

LITERATURA

[1] WHO, 2006 World Health Organisation, Guidlines for Drinking Water Quality, Recommendation, third ed., including the first addendum, vol 1, WHO, Geneva.

[2] 2001/928/Euratom Commission recommendation on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies. Official Journal of the European Communities 2001; C(2001) 4580.

[3] NN 73/07 Pravilnik o prirodnim mineralnim i prirodnim izvorskim vodama

[4] Rožmarić M, Benedik L, Rogić M, Barišić D. Određivanje prirodnih alfa radionuklida u komercijalno dostupnoj prirodnoj izvorskoj i mineralnoj vodi. Zbornik radova Osmog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja 2011.

[5] Vajda N, Rosa J.L, Zeisler R, Danesi P, Kis-Benedek G. A novel Technique for the simultaneous determination of ^{210}Pb and ^{210}Po using a crown ether. J Environ Radioativity 1997;37;355-372.

[6] Benedik L, Vasile M, Spasova Y, Wätjen U. Sequential determination of ^{210}Po and uranium radioisotopes in drinking water by alpha-particle spectrometry. Applied Radiation and Isotopes 2009;67;770-775.

[7] Nieri N, Mazzilli B. Evaluation of ^{210}Po and ^{210}Pb in some mineral spring waters in Brasil. J. Environ. Radioactivity 1998;41;11-18.

[8] Katzlberger C, Wallner G, Irlweck, K. Determination of ^{210}Pb, ^{210}Bi and ^{210}Po in natural drinking water. J Radioanal Nucl Chem 2001;249:191-196.

^{210}Pb AND ^{210}Po DETERMINATION IN BOTTLED WATER AVAILABLE ON THE CROATIAN MARKET

Matea Rogić[1], Ljudmila Benedik[2], Martina Rožmarić Mačefat[1] and Marko Štrok[2]
[1]Laboratory for Radioecology, Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
[2]Department of Environmental Sciences, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia
mrogic@irb.hr

An alpha emitting radionuclide ^{210}Po and beta emitting radionuclide ^{210}Pb are decay products of ^{238}U. Due to their nuclear properties they are considered as radionuclides with the highest radiotoxicity and contribute significantly to the internal dose to the population received by drinking water. For radiological impact assessment ^{210}Pb and ^{210}Po must be measured routinely and accurately, with low detection limits.

The aim of our study was determination of activity concentrations of ^{210}Pb and ^{210}Po in bottled drinking and mineral waters available on Croatian market. For their determination a procedure for their simultaneous separation from the water samples was used. After addition of ^{209}Po tracer and lead carrier, radionuclides were preconcentrated from large volume by MnO_2 and their separation from interfering elements by Sr resin was done. ^{210}Po source for alpha-particle spectrometric measurement was prepared by selfdeposition on silver disc, while lead was precipitated as lead sulphate and the beta activity of its daughter ^{210}Bi was counted on a beta proportional counter.

The results obtained show that values for activity concentrations of ^{210}Pb and ^{210}Po in all examined waters are in accordance with allowed activity concentration according to the European Commission Recommendation 2001/928/Euratom and Guidelines for Drinking Water Quality, published by WHO in 2006.

ODREĐIVANJE PRIRODNIH ALFA RADIONUKLIDA U KOMERCIJALNO DOSTUPNOJ PITKOJ I MINERALNOJ VODI

Martina Rožmarić Mačefat[1], *Ljudmila Benedik*[2], *Matea Rogić*[1] *i Delko Barišić*[1]
[1]Laboratorij za radioekologiju, Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska
[2]Odsek za znanosti o okolju, Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenia
rozmar@irb.hr

UVOD

Diljem svijeta obična vodovodna voda zamjenjuje se komercijalno dostupnim prirodnim izvorskim i mineralnim vodama koje se koriste i za proizvodnju raznih bezalkoholnih pića. Upravo zbog povećane potrošnje, kao i činjenice da izlaganje prirodnim izvorima doprinosi više od 98 % ukupnom ozračenju populacije, potrebno je odrediti ukupnu efektivnu dozu primljenu konzumacijom ovih proizvoda te odrediti doprinose pojedinih prirodnih radionuklida ukupnoj efektivnoj dozi. Glavni doprinos daju radionuklidi uranijevog i torijevog radioaktivnog niza i to sljedećim redoslijedom: ^{210}Po > ^{228}Ra > ^{210}Pb > ^{226}Ra > ^{234}U > ^{238}U > ^{224}Ra > ^{235}U. Uzimajući u obzir važnost vode za ljudski život kao i potrebu za što manjim izlaganjem zračenju, nužna je njena radiološka kontrola. Tako su maksimalne dozvoljene koncentracije aktivnosti radionuklida u vodi za piće propisane od strane Svjetske zdravstvene organizacije [1] i iznose 10 Bq/L za ^{238}U, 1 Bq/L za ^{234}U, ^{224}Ra i ^{226}Ra te 0,1 Bq/L za ^{210}Po, ^{228}Ra i ^{210}Pb.

Stoga je cilj ovog rada određivanje koncentracija aktivnosti alfa emitera te procjena ukupne godišnje efektivne doze od alfa emitera koju odrasla osoba primi konzumacijom komercijalno dostupnih prirodnih izvorskih i mineralnih voda s područja Hrvatske.

MATERIJALI I METODE

U radu su analizirani uzorci komercijalno dostupnih prirodnih izvorskih i mineralnih voda proizvedenih u Hrvatskoj [2].

Uranijevi radioizotopi prekoncentrirani su iz uzoraka sutaloženjem sa $Fe(OH)_3$ te odijeljeni od smetajućih elemenata upotrebom UTEVA smole (Eichrom Industries Inc.) uz određivanje iskorištenja pomoću ^{232}U [3]. Za pripremu alfa izvora korištena je mikroprecipitacija s NdF_3 [4,5].

Procedura za određivanje ^{226}Ra temeljila se na sutaloženju Pb(Ra)(Ba)SO_4 uz određivanje iskorištenja pomoću ^{133}Ba [6], dok je ^{210}Po određivan kao što je opisano u [2].

Za mjerenje aktivnosti korišteni su alfa spektrometri s PIPS poluvodičkim detektorima aktivne površine 450 mm^2 i efikasnošću od 28 % (IJS), odnosno 300 mm^2 i efikasnošću od 22 % (IRB). Alfa detektori su kalibrirani standardnim izvorom koji sadrži ^{238}U, ^{234}U, ^{239}Pu i ^{241}Am (Analytics). Za mjerenje ^{133}Ba korišten je koaksijalni HPGe detektor (IJS).

REZULTATI

Rezultati mjerenja koncentracija aktivnosti alfa emitera u prirodnim izvorskim i mineralnim flaširanim vodama prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Koncentracije aktivnosti alfa emitera u prirodnim izvorskim (IV) i mineralnim (MV) flaširanim vodama proizvedenima u Hrvatskoj s izraženom proširenom mjernom nesigurnošću (k = 2)

Oznaka uzorka	$A(^{238}U)$ mBq/L	$A(^{234}U)$ mBq/L	$A(^{226}Ra)$ mBq/L	$A(^{210}Po)$ [2] mBq/L
IV1	6,5 ± 0,3	7,3 ± 0,4	3,5 ± 0,3	0,8 ± 0,1
IV2	11,0 ± 0,6	16,0 ± 0,8	38,1 ± 1,5	2,3 ± 0,3
IV3	5,1 ± 0,7	7,7 ± 0,8	0,71 ± 0,17	0,6 ± 0,1
IV4	5,1 ± 0,6	9,0 ± 0,9	1,3 ± 0,2	0,51 ± 0,04
IV5	13,1 ± 1,5	36,5 ± 3,7	10,0 ± 1,5	0,9 ± 0,3
IV6	6,6 ± 0,8	9,6 ± 1,1	1,4 ± 0,2	2,1 ± 0,2
IV7	3,4 ± 0,3	4,7 ± 0,3	4,5 ± 0,3	0,6 ± 0,1
IV8	14,6 ± 1,5	21,5 ± 2,1	1,3 ± 0,3	3,0 ± 0,6
IV9	6,3 ± 0,8	7,8 ± 0,9	0,67 ± 0,17	1,1 ± 0,3
MV1	6,7 ± 0,7	6,4 ± 0,7	52,1 ± 2,5	0,7 ± 0,1
MV2	10,7 ± 1,0	15,3 ± 1,2	36,7 ± 1,5	0,7 ± 0,1
MV3	2,1 ± 0,3	7,3 ± 0,7	37,8 ± 1,4	0,25 ± 0,03

Iz rezultata (Tablica 1) je vidljivo da se koncentracije aktivnosti ^{238}U kreću u rasponu (2,1 – 14,6) mBq/L, dok su za ^{234}U (4,7 – 36,5) mBq/L. Vrijednosti koncentracija aktivnosti u prirodnim izvorskim i mineralnim vodama bitno se ne razlikuju. Znatno su i niže u odnosu na dozvoljene vrijednosti [1,7]. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra kreću se u rasponu (0,67 – 52,1) mBq/L pri čemu su najviše izmjerene u mineralnim vodama te samo jednoj prirodnoj izvorskoj vodi (IV2) čiji je izvor u sjevernoj Hrvatskoj, području poznatom po termalnim izvorima.

Na temelju dobivenih rezultata (Tablica 1) procijenjene su primljene godišnje efektivne doze za odrasle. Prema WHO [1] pretpostavljena je godišnja konzumacija od 730 L vode (prosječno 2 L vode dnevno) i za račun su uzeti dozni faktori za relevantne radionuklide dani u Tablici 2 [8].

Tablica 2. Dozni faktori (mSv Bq^{-1}) za određene radionuklide (odrasli)

radionuklid	^{238}**U**	^{234}**U**	^{226}**Ra**	^{210}**Po**
dozni faktor	$4{,}5\times10^{-5}$	$4{,}9\times10^{-5}$	$2{,}8\times10^{-4}$	$1{,}2\times10^{-3}$

Na Slici 1 prikazane su izračunate ukupne godišnje efektivne doze za odrasle koje su vrlo niske i kreću se u rasponu (1,11 – 11,7) μSv/god. Naime, ukoliko bi se tijekom jedne godine konzumirala samo voda s najvišom efektivnom dozom, postigla bi se vrijednost od 11,7 μSv/god što je svega 12 % maksimalne dozvoljene doze od 0,1 mSv [1].

Na Slici 2 prikazana je analiza doprinosa pojedinih alfa emitera prosječnoj godišnjoj ukupnoj efektivnoj dozi za konzumaciju isključivo izvorskih odnosno mineralnih voda. ^{226}Ra najviše doprinosi ukupnoj dozi u mineralnim vodama (89,4 %) jer je njegova koncentracija aktivnosti u njima znatno viša u odnosu na prirodne izvorske vode u kojima mu je i doprinos znatno niži (42,4 %) i gotovo podjednak doprinosu ^{210}Po (35,2 %). ^{210}Po je vrlo radiotoksičan pa ima visok dozni faktor te je njegov doprinos velik usprkos izmjerenim niskim koncentracijama aktivnosti. ^{238}U i ^{234}U manje su radiotoksični, a njihovi doprinosi ukupnoj efektivnoj dozi su niski za oba tipa uzoraka. Pored ranije spomenute visoke koncentracije ^{226}Ra, također je primijećen i sniženi udio izotopa uranija u mineralnim vodama u odnosu na prirodne izvorske vode.

Slika 1. Ukupne godišnje efektivne doze primljene od alfa emitera za odrasle osobe prikazane za prirodne izvorske i mineralne vode

Slika 2. Prikaz prosječnog udjela (%) alfa radionuklida u ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi koju prime odrasle osobe konzumiranjem flaširane prirodne izvorske i mineralne vode

ZAKLJUČAK

Iz rezultata prikazanih u ovom radu vidljivo je da su koncentracije aktivnosti alfa emitera ($^{234,238}U$, ^{226}Ra i ^{210}Po) u prirodnim izvorskim i mineralnim vodama proizvedenima u Hrvatskoj vrlo niske. To za posljedicu ima i vrlo niske izračunate ukupne godišnje efektivne doze za odrasle osobe primljene od alfa emitera koje iznose svega nekoliko postotaka maksimalno dozvoljene vrijednosti od 0,1 mSv.

ZAHVALA

Rad je financiran sredstvima Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske (bilateralni projekt "Radiokemijske metode za određivanje radionuklida u uzorcima vode") i Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije (bilateralni projekt BI-HR/10-11-007).

LITERATURA

[1] WHO, 2006 World Health Organisation, Guidlines for Drinking Water Quality, Recommendation, third ed., including the first addendum, vol 1, WHO, Geneva.

[2] Rogić M, Benedik Lj, Rožmarić M, Štrok M. Određivanje ^{210}Pb i ^{210}Po u vodama za piće dostupnima na hrvatskom tržištu. Zbornik radova Osmog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, 2011. (Ovaj Zbornik)

[3] Eichrom Techologies, Inc. Analytical Procedures. Uranium and Thorium in Water, 25 April 2001, Rev 1.7.

[4] Hindman F D. Neodymium fluoride mounting for alpha spectrometric determination of uranium, plutonium and americium. Analytical Chemistry 1983;55:2460-2461.

[5] Sill C W, Williams R L. Preparation of actinides for alpha spectrometry without electrodeposition. Analytical Chemistry 1981;53:415-421.

[6] Lozano J C, Fernandez F, Gomez J M G. Determination of radium isotopes by $BaSO_4$, coprecipitation for the preparation of α-spectrometic sources. J Radioanal Nucl Chem 1997;223(1–2):133-137.

[7] 2001/928/Euratom, Commission recommendation on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies. Official Journal of the European Communities 2001; C(2001): 4580.

[8] International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources, IAEA, 1996.

DETERMINATION OF NATURAL ALPHA EMITTING RADIONUCLIDES IN BOTTLED DRINKING AND MINERAL WATER

Martina Rožmarić Mačefat[1], Ljudmila Benedik[2], Matea Rogić[1] and Delko Barišić[1]
[1]Laboratory for Radioecology, Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
[2]Department of Environmental Sciences, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia
rozmar@irb.hr

Natural radionuclides from uranium and thorium decay chains are presented in Earth's crust and are leached by surface and groundwater, respectively. The geological setting strongly influences the occurrence of natural radionuclides in drinking water. Their quantitative determination is interesting from radioecological aspect because of their relatively high radiotoxicity and their importance in the study of cumulative radiation effects on human health.

In the present work alpha emitters (^{234}U, ^{238}U, ^{226}Ra and ^{210}Po) were analysed from all Croatian commercially available drinking and mineral water products, in order to assess the radiation doses from alpha emitting radionuclides. The collected samples originate from various geological regions of Croatia.

Uranium was preconcentrated from water samples by coprecipitation with $Fe(OH)_3$ at pH 9-10 using an ammonia solution. The radiochemical separation was performed using an UTEVA column. The source for alpha counting was prepared by microcoprecipitation with NdF_3. For determination of ^{226}Ra in water a coprecipitation procedure with $Pb(Ra)(Ba)SO_4$ was used and sources for alpha-particle spectrometry using $BaSO_4$ as carrier were prepared. Polonium was preconcentrated from large volume of water by MnO_2 and its separation from interfering elements by Sr resin was done. Source for alpha-particle spectrometry using selfdeposition on silver disk was prepared. Radiochemical recovery of the whole radiochemical procedure was determined by ^{232}U, ^{133}Ba and ^{209}Po respectively. The obtained results in all examined waters show that activity concentrations of investigated alpha emitters and their total annual effective dose contributions for adults are a few percent of the recommended guidance levels issued by EC and WHO, respectively.

RADIOACTIVITY OF ORE SITES OF LEAD, ZINC AND PHOSPHATE IN SERBIA

Dragana Todorović, Marija Janković, Jelena Nikolić and Duško Košutić
University of Belgrade, Institute Vinča, Radiation and Environmental Protection Department, Belgrade, Serbia
marijam@vinca.rs

INTRODUCTION

Radionuclides have been an essential constituent of the earth since its creation. The earth is still being heated through the decay of long-lived natural radionuclides e.g. uranium, thorium and potassium. All uses of natural or man-made radionuclides require an understanding of their environmental behaviour. Such knowledge is needed for their effective application as in-situ tracers or geo-chronometers and for estimation of human health risks. The advent of nuclear science resulted in the proliferation of nuclear applications and in the increase of environmental radioactivity levels. Further, we are exposed to radionuclides brought to the surface by man's traditional working activities such as mining operations and oil explorations, which have contributed to the increase of population radiation dose due to environmental radioactivity [1].

Examination of the presence of naturally occurring radionuclides in soil samples taken in the vicinity of planned locations for exploitation of lead and zinc ore from ore deposition "Podvirovi", K.O. Karamanica – Bosilegrad region and lead and zinc ore deposition "Suva Reka" – Raška region and phosphate ore from ore deposition "Lisina" – Bosilegrad region, were conducted in order to define the state of natural environment prior to any excavation and to determine the impact of subsequent excavation on natural level of radiation. Measurements of radioactivity were performed by Environmental and Radiation Protection Laboratory in the Institute for Nuclear Sciences "Vinča".

The aim of this paper was to conduct preliminary measurements in the soil samples taken in the vicinity of planned locations for exploitation of lead, zinc and phosphate ore because it is essential to establish the radiological base-line data.

MATERIAL AND METHODS

Before measurements soil samples were dried at 105 ºC, sieved and placed in the plastic container of 100 g. Some samples were measured immediately after preparation and some samples were left for four weeks to reach radioactive equilibrium [2,3], and measured after that. The samples were counted using a high purity germanium detector (HPGe) with relative efficiency of 23 % and energy resolution of 1.8 keV for the 1332 keV ^{60}Co peak. The spectra were analyzed using the program GENIE 2000. The activity of ^{226}Ra and ^{232}Th was determined by their decay products: ^{214}Bi (609 keV, 1120 keV and also 1764 keV), ^{214}Pb (295 keV and 352 keV) and ^{228}Ac (338 keV and 911 keV), respectively. The activities of ^{40}K and ^{137}Cs were determined from its 1460 keV and 661 keV γ-line, respectively. ^{235}U was determined on 143 keV and 163 keV. ^{238}U was determined by ^{234}Th (63 keV) or by ^{234}Pa (1000 keV). Counting time interval was 52 000 s. The background spectrum was recorded immediately after or before the sample counting. The combined uncertainty of the results was maximum 20 %.

Measurement of the ambient gamma radiation dose rate in ground level air (1 m above the ground) was performed using scintillation probe AUTOMESS, type 6150 AD-6/H, serial no. 109-281, resolution 1 nSv h^{-1}.

RESULTS

The obtained results for activity concentrations in soil samples taken from locations of lead and zinc ore deposits (Bosilegrad and Raška) and from locations of phosphate ore deposits (Bosilegrad) are presented in Tables 1 – 3. Results showed the presence of natural radionuclides ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K, ^{235}U, ^{238}U as well as the produced radionuclide ^{137}Cs (from the Chernobyl accident).

For soil samples taken from the locations of lead and zinc ore deposits (Raška), obtained concentrations of radionuclides were: 20 – 37 Bq kg^{-1} for ^{226}Ra, 25 – 42 Bq kg^{-1} for ^{232}Th, 449 – 1043 Bq kg^{-1} for ^{40}K, 27 – 37 Bq kg^{-1} for ^{238}U, 1.7 - 2.3 Bq kg^{-1} for ^{235}U and 0.7 – 17 Bq kg^{-1} for ^{137}Cs. The obtained values of ambient gamma dose rate ranged from 70 to 150 nSv h^{-1} (Table 1).

Range of obtained activity concentrations in soil taken from the locations of lead and zinc ore deposits (Bosilegrad) was: 8 – 21 Bq kg^{-1} for ^{226}Ra, 7 – 30 Bq kg^{-1} for ^{232}Th, 242 – 711 Bq kg^{-1} for ^{40}K, 26 – 30 Bq kg^{-1} for ^{238}U, 0.6 – 2.8 Bq kg^{-1} for ^{235}U and 3.3 – 51 Bq kg^{-1} for ^{137}Cs. The obtained values of ambient gamma dose rate ranged from 74 to 87 nSv h^{-1} (Table 2).

Table 1. Activity concentrations of radionuclides in soil samples taken from the locations of lead and zinc ore deposits (Raška) (Bq kg^{-1}) and the values of ambient gamma dose rate (nSv h^{-1})

Location	**Dose rate** (nSv h^{-1})	**Activity concentration** (Bq kg^{-1})					
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{238}U	^{235}U	^{137}Cs
Barren land, adjacent soil	70	20±3	25±3	542±48	28±5	1.8±0.2	2.3±0.3
Barren land, farther soil	90	23±3	42±4	449±40	37±8	2.1±0.3	0.7±0.2
Fluctuation, adjacent soil	110	28±3	35±4	470±42	27±7	1.7±0.2	8±2
Fluctuation, vilage Kaznovići, farther soil	99	33±4	42±4	475±42	36±6	2.0±0.2	17±2
Mining site Kiževar, adjacent soil	150	37±4	39±4	1043±89	35±7	2.3±0.2	<1
Mining site Kiževar, farther soil	130	35±4	36±4	627±56	27±7	1.8±0.2	3.1±0.4

Activity concentrations ranged from 12 – 51 Bq kg^{-1} for ^{226}Ra, 11 – 32 Bq kg^{-1} for ^{232}Th, 333 – 796 Bq kg^{-1} for ^{40}K, 19 – 37 Bq kg^{-1} for ^{238}U, 0.5 - 3.3 Bq kg^{-1} for ^{235}U and 5.8 – 70 Bq kg^{-1} for ^{137}Cs in samples taken from the locations of phosphate ore deposits (Bosilegrad). Ambient gamma dose rate ranged from 78 to 123 nSv h^{-1} (Table 3).

All obtained values of activity concentrations are typical for soil samples, and there is no difference compared to soil samples from other locations in Serbia [4,5]. Also there was no significant difference between content of natural radionuclides in soil samples which were taken in different locations around the ore deposits. The average concentrations of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K, measured in the investigated soil samples are close to the worldwide average concentrations in the soil reported in UNSCEAR, 2000: ^{226}Ra (32 Bq kg^{-1}), ^{232}Th (45 Bq kg^{-1}) and ^{40}K (420 Bq kg^{-1}) [6]. The obtained values for activity concentrations in soil are comparable to those reported for other countries [1,7-11].

The obtained values of ambient gamma radiation dose rate in ground level air are of the same order of magnitude as in other locations in Serbia.

Table 2. Activity concentrations of radionuclides in soil samples taken from the locations of lead and zinc ore deposits (Bosilegrad) (Bq kg^{-1}) and the values of ambient gamma dose rate (nSv h^{-1})

Location	**Dose rate** (nSv h^{-1})	**Activity concentration** (Bq kg^{-1})					
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{238}U	^{235}U	^{137}Cs
25 m from the shaft no.1 L.1.1.	80	10±2	10±2	295±30	26±5	2.8±0.6	51±5
20 m below the barren land L.1.2. margin	85	<4	7±1	242±24	<13	<0.6	3.3±0.4
25 m from the shaft no. 2 L.1.3.	74	<5	8±1	329± 6	<15	<0.6	21±2
100 m from and 10 m below the barren land L.1.4.	75	8±1	15±2	290±29	27±8	0.6±0.1	11±1
2 km from the site, reference level L.1.5.	87	21±4	30±4	711±57	30±7	2.3±0.3	27±2

CONCLUSION

The results of the present work indicate that the area under investigation can be categorized as area where exploitation of lead, zinc and phosphate ore can be done. The presence of natural radionuclides ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K, ^{235}U, ^{238}U as well as the produced radionuclide ^{137}Cs in soil samples from the locations of ore deposits are similar as those reported for other countries.

Acknowledgment

The investigation was partially supported by the Ministry of Science and Technological Development of Serbia under the following Project III43009.

REFERENCES

[1] El Mamoney M H, Khater A E M. Environmental characterization and radio-ecological impacts of non-nuclear industries on the Red Sea coast. Journal of Environmental Radioactivity 2004; 73:151-168.

[2] HASL-300. Procedures Manual. EML. New York; 1983.

Table 3. Activity concentrations of radionuclides in soil samples taken from the locations of phosphate ore deposits (Bosilegrad) (Bq kg^{-1}) and the values of ambient gamma dose rate (nSv h^{-1})

Location	**Dose rate** (nSv h^{-1})	**Activity concentration** (Bq kg^{-1})					
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{238}U	^{235}U	^{137}Cs
Soil below future dam of the barren land no.2	98	27 ± 3	26 ± 3	711 ± 57	24 ± 10	2.1 ± 0.3	< 0.4
Gloški dol, soil about 3 km from the barren land no.2	95	37 ± 4	17 ± 2	423 ± 42	33 ± 5	0.5 ± 0.1	5.8 ± 0.7
Soil below future dam of the ore flotation	78	15 ± 2	11 ± 3	333 ± 34	<17	2.1 ± 0.4	47 ± 3
Soil below future dam of the barren land no.1	120	26 ± 3	32 ± 4	796 ± 80	34 ± 7	3.3 ± 0.4	70 ± 5
Soil from the river junction	88	28 ± 3	26 ± 3	515 ± 52	36 ± 7	1.8 ± 0.3	28 ± 2
Soil from the lake, 500 m from the dam of accumulation lake	111	12 ± 1	32 ± 3	706 ± 42	37 ± 12	2.8 ± 0.4	33 ± 2
Soil from the future mining site Panjevica	103	14 ± 3	32 ± 3	570 ± 57	37 ± 12	2.4 ± 0.5	28 ± 3
Soil near the shaft , deep mining site	123	51 ± 5	32 ± 3	767 ± 77	19 ± 6	1.4 ± 0.2	35 ± 2

[3] Technical Report Ser. No. 295. Measurements of Radionuclides in Food and the Environment. Vienna: IAEA; 1989.
[4] Todorović D, Radenković M, Popović D, Ivanov S, Djurić G. Contents of radionuclides in the region of Stara planina. Proc. IV Yugoslav Symposium, Chemistry and Environment; 2001; Zrenjanin, Serbia. 2001. pp. 431-433.
[5] Bikit I, Slivka J, Conkic Lj, Krmar M, Veskovic M, Žikic-Todorovic N, Varga E, Curcic S, Mrdja D. Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro). J Environ Radioact 2005; 78:11–19.
[6] UNSCEAR. Sources and effects of ionising radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. United Nations, New York, USA: 2000.
[7] Selvasekarapandian S, Sivakumar R, Manikandan N M, Meenakshisundaram V, Raghunath V M, Gajendran V. Natural radionuclide distribution in soils of Gudalore, India. Applied Radiation and Isotopes 2000; 52:299-306.
[8] Jankovic M, Todorovic D, Savanovic M. Radioactivity measurements in soil samples collected in the Republic of Srpska. Radiation Measurements 2008; 43:1448-1452.
[9] Cesar D, Sokolovic E, Kovač J. Radioactivity of soil in Croatia. In: Franić Z, Kubelka D, Eds. Proceedings 2nd Symposium of Croatian Radiation Protection Society; 1994; Zagreb, Croatia. 1994. pp. 107–114.
[10] Isinkaye M O. Radiometric assessment of natural radioactivity levels of bituminous soil in Agbabu, southwest Nigeria. Radiation Measurements 2008; 43:125-128.
[11] Anagnostakis M J, Hinis E P, Simopoulos S E, Angelopoulos M G. Natural radioactivity mapping of Greek surface soils. Environmental International 1996;23:S3-S8.

ABSTRACT

Natural resources such as ores contain radioactive nuclides at various concentrations. Therefore it is important to investigate the radioactivity in these resources as well as in the soil at the locations of ore deposits. For that reason we conducted preliminary measurements in the soil samples taken from the locations of lead and zinc ore deposits (Bosilegrad and Raška) and from the locations of phosphate ore deposits of phosphate (Bosilegrad).

The activity concentrations of radionuclides in soil samples were determined by gamma spectrometry (HPGe detector, relative efficiency 23 %). Results showed the presence of natural radionuclides ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K, ^{235}U, ^{238}U as well as the produced radionuclide ^{137}Cs (from the Chernobyl accident). Ambient gamma radiation dose rate in ground level air was also measured.

PROCJENA UTJECAJA TERMOELEKTRANE KAKANJ NA TLO I VEGETACIJU U BLIŽEM OKRUŽENJU POSTROJENJA

Nedžad Gradaščević, Davorin Samek, Lejla Saračević i Anto Mihalj
Katedra za radiobiologiju, biofiziku i zaštitu životne sredine,
Veterinarski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Bosna i Hercegovina
nedzad.gradascevic@vfs.unsa.ba

UVOD

Sagorijevanje uglja u termoelektranama dovodi do koncentrisanja radionuklida uranijumove i torijumove serije, kao i kalijuma u nesagorenom ostatku (pepelu i šljaci) koji u okoliš može biti otpušten u obliku letećeg pepela ili pak deponovan na deponijama pepela i šljake odakle, nakon resuspenzije, dolazi do širenja pepela u bliže ili dalje okruženje.

Veliki broj radova koji razmatraju utjecaj industrijskih postrojenja na okoliš usmjeren je na istraživanje depozicije radionuklida iz pepela na površinskom sloju tla, odnosno na procjenu utjecaja emisije letećeg pepela na tlo i vegetaciju u okruženju ovih postrojenja [1-4,7-9].

Depozicija letećeg pepela na tlo uzrokuje povišene nivoe prirodnih radionuklida u odnosu na "background" vrijednosti kao i na dublje slojeve tla. Razlike u distribuciji prirodnih radionuklida u profilu tla, odnosno opadanje njihovih koncentracija sa dubinom tla smatra se stoga dokazom utjecaja termoelektrana, ali i drugih NORM industrija, na okoliš u slučajevima kada nisu poznate "background" vrijednosti prirodnih radionuklida u tlu [4,9].

Kontaminacija biljaka odvija se deponiranjem radionuklida iz letećeg pepela na površini biljaka (površinska kontaminacija) ili se radionuklidi iz tla u biljke unose preko korjenog sistema. Resuspenzija radionuklida sa površine tla na vanjske dijelove biljaka je također važan faktor kontaminacije biljaka i dešava se uslijed djelovanja kiše i vjetra ili napasanja životinja [10].

U ovom radu prikazan je dio rezultata istraživanja utjecaja termoelektrane Kakanj na kontaminaciju tla i vegetacije u neposrednom okruženju postrojenja u okviru višegodišnjeg programa monitoringa radioaktivnosti ovoga područja.

MATERIJAL I METODE RADA

Mjerenja brzine apsorbirane doze gama zračenja vršena su pomoću dozimetra tvrtke Berthold Model LB 123 na 1 metar iznad tla sa statističkom greškom mjerenja od 10 %.

Uzorkovanje tla vršeno je sa po jedne tačke unutar i izvan očekivane zone utjecaja termoelektrane. Očekivana zona utjecaja termoelektrane obuhvatala je radijus od 5 km od postrojenja uzduž dominantnog smjera vjetra (sjever-sjeverozapad: jug-jugoistok). Tlo je uzorkovano sa 3 dubine: 0 – 5 cm, 5 – 10 cm i 10 – 15 cm. Uzorci trave i sijena uzimani su sa livada i pašnjaka u zonama utjecaja.

Priprema uzoraka se izvodila prema standardnoj metodologiji [5].

Gamaspektrometrijska mjerenja vršena su na vertikalnom koaksijalnom HPGe POP-TOP detektoru p-tipa, proizvođača ORTEC, model GEM 30P4, sa relativnom efikasnošću 30 % i rezolucijom 1,85 keV na 1,33 MeV.

Aktivnosti ispitivanih radionuklida (^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra i ^{40}K) mjerene su iz njihovih gama linija i gama linija njihovih potomaka.

Kao dodatna metoda za provjeru rezultata pri mjerenju niskih aktivnosti korištena je metoda komparativnog mjerenja sa standardnim uzorkom poznatih niskih aktivnosti. U tu svrhu je korišten standardni uzorak IAEA-414. Vrijeme mjerenja iznosilo je 80 000 sekundi, a rezultat je obračunavan po kilogramu suhog uzorka tla, odnosno nativnog uzorka trave i sijena.

REZULTATI

Na Karti 1 prikazani su rezultati mjerenja apsorbirane doze zračenja u okruženju termoelektrane Kakanj. Dobivene vrijednosti su se kretale od 96 do 210 nGy h^{-1}. Visok raspon dobivenih vrijednosti kao i statistički parametri (SD = 16,8) ukazivali su na varijacije vrijednosti doze na području ovog lokaliteta. Najviše vrijednosti izmjerene su na deponiji pepela i šljake, a najniže na područjima izvan utjecaja postrojenja. Blago povišene doze izmjerene su na tačkama uzduž dominirajućeg smjera vjetra ovog područja (sjever-sjeverozapad : jug- jugoistok) tako da se područje smješteno uzduž tog smjera na udaljenosti do 5 km od postrojenja može smatrati užom zonom utjecaja termoelektrane.

Karta 1. Brzine apsorbiranih doza zračenja na 1 m iznad tla u okolini TE Kakanj

Osobenost ovog lokaliteta je činjenica da, pored dimnjaka termoelektrane, izvor širenja radionuklida u okoliš predstavlja i suha deponija šljake i pepela sa koje se vjetrom i resuspenzijom pepeo širi u okoliš na znatno kraće rastojanje u odnosu na pepeo iz dimnjaka.

Prosječne vrijednosti prirodnih radionuklida iz po 6 uzoraka tla sa tri dubine prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1. Prosječne aktivnosti ^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra, ^{40}K (Bq kg^{-1}) u uzorcima profila tla izvan zone utjecaja (Tačka 1 – T1) i unutar zone utjecaja (Tačka 2 – T2) TE Kakanj, te srednje vrijednosti

n = 6	**T1**	**T2**	**T1**	**T2**	**T1**	**T2**	**T1**	**T2**
Dubina	0 – 5 cm		5 – 10 cm		10 – 15 cm		Srednja 0 – 15 cm	
^{238}U	30,17	43,2	28,2	47,1	31,6	40,30	30,00	43,5
^{232}Th	35,64	39,2	34,1	38,9	38,5	36,20	35,41	38,1
^{226}Ra	31,70	40,3	30,7	40,3	32,3	38,15	31,56	39,6
^{40}K	416,83	524,5	426,0	526,5	412,1	542,40	418,31	531,1
Ukupno	514,34	647,2	519,0	652,8	512,5	657,05	515,28	652,3

Dobivene vrijednosti nisu ukazivale na povišene nivoe radionuklida u tlu u poređenju sa ostalim evropskim zemljama i zemljama regiona Južne Evrope sa izuzetkom ^{40}K koji je pokazao nešto više nivoe u odnosu na vrijednosti dobivene u susjednim zemljama [11]. Međutim, u uzorcima sa lokaliteta izvan utjecaja termoelektrane zabilježeni su niži nivoi ispitivanih radionuklida u poređenju sa vrijednostima utvrđenim na lokalitetima pod utjecajem termolektrane što je potvrdilo da smjer vjetra ima značajnu ulogu u širenju radioaktivnosti iz termoelektrana u okoliš. Odnos učešća ispitivanih radionuklida u zoni utjecaja i izvan nje bio je 1,27 pri čemu je odnos pojedinih radionuklida unutar i izvan zone utjecaja iznosio 1,45 za ^{238}U, 1,07 za ^{232}Th, 1,25 za ^{226}Ra i 1,27 za ^{40}K. Dobiveni rezultati, međutim nisu pokazali značajnije razlike po profilu tla, što navodi na zaključak da "background" vrijednosti ispitivanih radionuklida leže na većoj dubini od dubina razmatranih u ovom radu, što je u saglasnosti sa rezultatima iz [3].

Mjerenja koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida vršena su u uzorcima trave i sijena unutar zone utjecaja termoelektrane Kakanj (Tabela 2). Utvrđene koncentracije aktivnosti su varirale u zavisnosti od smjera vjetra i udaljenosti od termoelektrane. Uzrok viših aktivnosti ispitivanih radionuklida u uzorcima sijena i trave u odnosu na ostala područja u BiH je svakako depozicija pepela na površini biljaka, a naročito trave, u zonama utjecaja termoelektrane kao i resuspenzija pepela sa deponije pepela i šljake [10].

Tabela 2. Koncentracije aktivnosti ^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra i ^{40}K (Bq kg^{-1}) u uzorcima sijena i trave u okruženju TE Kakanj

	^{238}**U**	^{232}**Th**	^{226}**Ra**	^{40}**K**
Sijeno	0,25 ± 0,04	0,03 ± 0,01	0,56 ± 0,15	401 ± 38
	0,60 ± 0,13	0,03 ± 0,01	1,09 ± 0,25	454 ± 42
	0,80 ± 0,20	0,03 ± 0,01	1,11 ± 0,25	451 ± 42
	0,70 ± 0,17	0,05 ± 0,02	1,07 ± 0,25	457 ± 43
Srednja	*0,588*	*0,04*	*0,96*	*440,6*
SD	*0,240*	*0,011*	*0,27*	*26,3*
Trava	0,16 ± 0,04	0,01 ± 0,003	0,24 ± 0,05	101 ± 12
	0,18 ± 0,04	0,02 ± 0,004	0,28 ± 0,06	110 ± 12
	0,24 ± 0,06	0,01 ± 0,002	0,33 ± 0,07	112 ± 12
	0,20 ± 0,04	0,01 ± 0,003	0,40 ± 0,08	106 ± 12
Srednja	*0,20*	*0,012*	*0,313*	*107,6*
SD	*0,034*	*0,008*	*0,069*	*4,9*

Prisustvo pepela na površini sijena i trave u zoni utjecaja uočeno prilikom uzorkovanja potvrđeno je i većim ukupnim sadržajem pepela u odnosu na uzorke trave i sijena sa ostalih lokaliteta iz BiH. Statističkom analizom rezultata utvrđena je statistički značajna korelacija odnosa aktivnosti uranijuma i radijuma u uzorcima sijena (R = 0,96) nasuprot statistički neznačajne korelacije ova dva radionuklida utvrđene za uzorke trave (R = 0,56). Ovaj nalaz ide u prilog tvrdnji da veće procentualno učešće pepela termoelektrane u uzorcima trave u odnosu na uzorke sijena uzrokuje poremećaj ravnoteže ova dva radionuklida u uzorcima trave

ZAKLJUČCI

Visoke standardne devijacije dobivenih rezultata za tlo, travu i sijeno u okruženju termoelektrane Kakanj ukazale su na neujednačenu prostornu distribuciju radioaktivnosti nastalu neujednačenom prostornom distribucijom pepela iz postrojenja. Dobivene vrijednosti su također ukazale na važnost dominantnog smjera vjetra kao faktora koji, u slučaju visokih nivoa radionuklida u pepelu termoelektrane, može značajno utjecati na nivo distribucije radioaktivnosti u okoliš.

REFERENCE

[1] Beck HL, Miller KM. Some radiological aspects of coal combustion. IEEE Transactions on Nuclear Science NS 1980;27(1):689-694.

[2] Bem H, Wieczorkowski P, Budzanowski M. Evaluation of technologically enhanced natural radiation near the coal-fired power plants in the Lodz region of Poland. Journal of Environmental Radioactivity 2002;61(2):191-201.

[3] Flues M, Moraes V, Mazzilli BP. The influence of a coal-fired power plant on radionukide concentration in soil. Journal of Environmental Radioactivity 2002;63:285-294.

[4] Gradaščević N. Utjecaj radioaktivnih industrijskih polutanata na kontaminaciju lanca ishrane i animalnih proizvoda preživara, Doktorska disertacija, Veterinarski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 2009.

[5] International Atomic Energy Agency (IAEA). Measurement of Radionuclides in Food and the Environment – A Guidebook, Technical Reports Series No. 295. Vienna: IAEA; 1989.

[6] Man-yin WT, Leung JKC. Radiological impact of coal ash from the power plants in Hong Kong. Journal of Environmental Radioactivity 1996;30:1-14.

[7] Papastefanou C. Radiation impact from lignite burning due to ^{226}Ra in Greek coal-fired power plants. Health Physics 1996;70(2):187-191.

[8] Papastefanou C, Manolopoulou M, Charalambous S. Radioecological measurements in the coal power plant environment. Radiation Protection Dosimetry 1988:24:439-443.

[9] Papp Z, Dezso Z, Daroczy S. Significant radioactive contamination of soil around a coal-fired thermal power plant. Journal of Environmental Radioactivity 2002;59:191-205.

[10] Prohl G, Hoffman FO. Radionuclide interception and transport and loss processes in vegetation. In IAEA (ed.) Modelling of radionuclide interception and loss processes in vegetation and of transfer in semi-natural ecosystems. Second rep. of the VAMP Terrestrial Working Group, Vienna, January 1996. IAEA TECDOC-857. International Atomic Energy Agency, Vienna. 9-47.

[11] UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, UN, New York.

IMPACT ASSESSMENT OF COAL-FIRED POWER PLANT KAKANJ ON THE SOIL AND VEGETATION IN SUROUNDINGS OF THE FACILITY

Nedžad Gradaščević, Davorin Samek, Lejla Saračević and Anto Mihalj
Department of Radiobiology and Biophysics,
Veterinary Faculty, University of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina
nedzad.gradascevic@vfs.unsa.ba

In the paper, the impact of fly ash produced in activities of the coal-fired power plant in Kakanj, Bosnia and Herzegovina, was investigated in suroundings of the facility (3 – 5 km).

Measurements of the dose rate at 1 m above the ground showed slightly increased values along the dominant wind direction with values that were in the range 96 – 210 nGy h^{-1}. The highest values of dose rate were recorded at the waste storage site of the facility.

Measurements of the activity levels of the natural radionuclides (^{238}U, ^{232}Th, ^{226}Ra i ^{40}K) in the soil showed values that were in following ranges: 28.20 – 48.65 Bq kg^{-1} for ^{238}U, 26.03 – 52.36 Bq kg^{-1} for ^{232}Th, 19.37 – 40.30 Bq kg^{-1} for ^{226}Ra and 101.35 – 456.81 Bq kg^{-1} for ^{40}K.

Activity levels of investigated radionuclides in samples of hay and grass were: 0.16 – 0.8 Bq kg^{-1} for ^{238}U, 0.008 – 0.054 Bq kg^{-1} for ^{232}Th, 0.240 – 1.110 Bq kg^{-1} for ^{226}Ra and 101.35 – 456.81 Bq kg^{-1} for ^{40}K.

High standard deviations of obtained results pointed out on the unequal spatial distribution of the observed radionuclides in the suroundings of the facility. Obtained results showed the slight impact of the facility on environment and highlighted the significance of the dominant wind direction on distribution of radioactivity in environment.

LOKALNOSTI SA POVEĆANIM FONOM GAMA ZRAČENJA U ZONI VISOKI KRŠ U CRNOJ GORI

Perko Vukotić[1], Ranko Svrkota[2], Tomislav Anđelić[3], Ranko Zekić[3] i Nevenka Antović[4]
[1]Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Podgorica, Crna Gora
[2]Republički zavod za geološka istraživanja, Podgorica, Crna Gora
[3]Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora
[4]Prirodno-matematički fakultet, Podgorica, Crna Gora
pvukotic@yahoo.com

UVOD

Tokom 2008. i 2009. godine, u okviru projekta Crnogorske akademije nauka i umjetnosti (CANU), sprovedeno je istraživanje koje je imalo za cilj da otkrije mjesta u Crnoj Gori sa povećanim terestrijalnim gama zračenjem.

U Crnoj Gori jasno se izdvajaju četiri geotektonske ili strukturno-facijalne jedinice [1,2]: Jadransko-Jonska zona (JZ), Budva-Cukali zona (BZ), zona Visoki krš (VK) i Durmitorska tektonska jedinica (DTJ). Jedinici Visoki krš pripadaju središnji i južni dijelovi Crne Gore, a izgrađena je od permskih i donjetrijaskih klastita, karbonatnih sedimenata trijasa, jure i krede, sa rudonosnim formacijama crvenih i bijelih boksita, vulkanita i vulkanoklastita srednjeg trijasa, trijaskih i paleogenih flišnih sedimenata i kvartarnih sedimenata.

Pored literature o geologiji Crne Gore [1,2], kao osnov ovog projekta korišćeni su i rezultati ranijeg sistematskog istraživanja fona gama zračenja u Crnoj Gori [3,4]. Ono je pokazalo da u Crnoj Gori srednja jačina apsorbovane doze zračenja u vazduhu, 1 m iznad tla, ima vrijednost 55 nGy/h (srednja vrijednost za zemlje Južne Evrope je 62 nGy/h [5]). Stoga je arbitrarno usvojeno da se kao lokalnosti sa povećanim fonom gama zračenja u Crnoj Gori smatraju one na kojima je jačina doze u vazduhu najmanje za 50 % veća od srednje za Crnu Goru, tj. mjesta na kojima je $D \geq 80$ nGy/h.

U ovom radu prikazuju se rezultati projekta CANU koji se odnose na istraživanje fona gama zračenja terestrijalnog porijekla u zoni Visoki krš.

MATERIJAL I METODE

Pristup izboru lokalnosti za mjerenja doze zračenja prilagođen je cilju istraživanja – "avorizovane" su geološke formacije sa stijenama/mineralima

za koje je indikovana mogućnost povećanog sadržaja radionuklida. Ukupno je u Crnoj Gori odabrano 138 lokalnosti i one su prikazane na Slici 1.

Slika 1. Geološka karta Crne Gore sa označenim ispitivanim lokalnostima

U zoni Visoki krš izabrano je 38 lokalnosti za terenska mjerenja: 9 na kvartarnim sedimentima (glina, fluvioglacijal, treset, aluvijum), 4 na flišnim sedimentima (anizijski, kredno-paleogeni i eocenski fliš), 9 na karbonatnim

sedimentima (krečnjaci i krečnjaci sa rožnacima, bitumenozni sedimenti), 3 na vulkanitima, 11 na boksitima i 2 na paleozojskim pješčarima.

Za mjerenja doze zračenja korišćen je uređaj VICTOREEN 190 SI sa NaI 2"×2" sondom, a za povremena kontrolna mjerenja THERMO RadEye. Mjerenja su rađena po suvom vremenu, na visini 1 m iznad tla. U cilju pokrivanja što veće površine ispitivane lokalnosti i time veće reprezentativnosti rezultata mjerenja, na svakoj lokalnosti rađeno je na različitim mjestima 10 mjerenja, iz kojih su određivani opseg rezultata i srednja jačina apsorbovane doze D_{sr}.

Od 38 ispitanih lokalnosti u zoni Visoki krš, na 12 je izmjereno $D_{sr} \geq$ 80 nGy/h: osam u oblasti boksititnih ležišta (crveni boksiti: VK-25, 33, 35; bijeli boksiti: VK-21a, 23, 24, 26, 27), dvije na fluvioglacijalnim nanosima – pijesak i šljunak (VK-20, 22), jedna na bankovitim krečnjacima (VK-28) i jedna na vulkanitu andezitskog tipa (VK-7a). Sa tih lokalnosti, po standardnoj "Core Sampling" proceduri, uzeti su uzorci tla za gama-spektrometrijsku analizu. Uzorkovani materijal je drobljen i mljeven, sušen 8 sati na 100 °C, prosijavan na situ prečnika 2 mm i potom pakovan u Marineli posude od 1 L. Ovako pripremljeni analitički uzorci snimani su tek nakon 40 dana, kada je uspostavljena radioaktivna ravnoteža ^{226}Ra i ^{222}Rn.

Uzorci su analizirani na niskofonskom sistemu sa dva HPGe detektora efikasnosti 36 % i 41 % i rezolucije (FWHM 1,33 MeV ^{60}Co) 1,72 keV i 1,80 keV respektivno, čiji fon na energetskom području 40 – 2700 keV je 0,98 imp s^{-1} i 1,22 imp s^{-1} respektivno. U uzorcima su određivane koncentracije aktivnosti radionuklida ^{40}K (1460,75 keV), ^{232}Th (338,32 keV, 911,20 keV), ^{235}U (143,76 keV, 163,33 keV), ^{238}U (1001,03 keV), ^{226}Ra (295,22 keV, 351,93 keV, 609,31 keV, 1120,2 keV, 1764,4 keV) i ^{137}Cs (661,62 keV).

REZULTATI

Jačine doze u vazduhu i koncentracije aktivnosti radionuklida u tlu za 12 lokalnosti sa povećanom radioaktivnošću prikazane su u Tabeli 1.

U zoni Visoki krš nađeno je pet lokalnosti sa najvećim uopšte, u ovom istraživanju, izmjerenim dozama zračenja u Crnoj Gori. Najveća doza, 192 nGy/h, izmjerena je u Bukoviku kod Virpazara (VK-7a), gdje je u podlozi andezit, a ostale četiri lokalnosti, sa dozama 131 – 149 nGy/h, u području su Cetinja i Nikšića i karakterišu ih izdanci boksita. U poređenju sa poznatim područjima u svijetu sa visokim fonom prirodnog zračenja [5], ove lokalnosti u Crnoj Gori spadaju u red onih sa umjerenim povećanjem fona.

Tabela 1. Jačine apsorbovane doze u vazduhu i koncentracije aktivnosti radionuklida u tlu na lokalnostima u zoni Visoki krš sa relativno povećanim fonom gama zračenja.

Oznaka lokalnosti	***Dsr*** (nGy/h)	**^{40}K** (Bq/kg)	**^{226}Ra** (Bq/kg)	**^{232}Th** (Bq/kg)	**^{235}U** (Bq/kg)	**^{238}U** (Bq/kg)	**^{137}Cs** (Bq/kg)
VK-7a	192	2329 ± 75	31,2 ± 1,1	51,2 ± 1,8	2,3 ± 0,9	64,8 ± 13,1	5,6 ± 0,2
VK/20	125	27,4 ± 1,8	73,0 ± 2,3	194 ± 6	4,12 ± 1,23	113 ± 14	20,2 ± 0,65
VK/21a	131	159 ± 5	92,3 ± 3	126 ± 4	7,8 ± 0,8	137 ± 13	20,2 ± 0,7
VK/22	96	343 ± 11	210 ± 7	62,2 ± 2,1	8,43 ± 1,03	89,4 ± 23,7	60,4 ± 1,9
VK/23	137	109 ± 4	76,1 ± 2,4	129 ± 4	4,08 ± 0,71	73,5 ± 15,5	< 0,43
VK/24	134	164 ± 6	151 ± 5	169 ± 5	9,44 ± 1,32	151 ± 20	5,24 ± 0,26
VK/25	149	173 ± 6	48,8 ± 1,6	196 ± 6	2,71 ± 0,54	66,0 ± 9,5	0,79 ± 0,11
VK/26	101	95,4 ± 3,6	138 ± 5	133 ± 4	8,24 ± 0,92	172 ± 18	0,64 ± 0,16
VK/27	115	145 ± 5	239 ± 7	166 ± 5	16,2 ± 1,1	285 ± 190	1,40 ± 0,15
VK/28	91	390 ± 12	167 ± 5	91 ± 3	7,89 ± 1,07	66,0 ± 18,8	255 ± 8
VK/33	110	109 ± 4	66,8 ± 2,2	201 ± 6	4,92 ± 0,7	114 ± 13	2,95 ± 0,17
VK/35	112	146 ± 5	43,4 ± 1,4	198 ± 6	2,01 ± 0,53	38,0 ± 9,6	4,3 ± 0,2

Srednje vrijednosti koncentracija radionuklida u tlu za Crnu Goru su [3]: 246 Bq/kg za ^{40}K, 24 Bq/kg za ^{232}Th i 29 Bq/kg za ^{238}U, a za zemlje Južne Evrope [5]: 433 Bq/kg za ^{40}K, 35 Bq/kg za ^{232}Th i 52 Bq/kg za ^{238}U. U svjetlu tih vrijednosti, iz Tabele 1 slijedi da je uzrok povećane doze zračenja na lokalnosti VK-7a, gdje je u podlozi prisutan andezit, visoka koncentracija K (2329 Bq/kg) i donekle U u tlu, a na ostalim lokalnostima, gdje su prisutni izdanci boksita, znatno povećane koncentracije U i Th (^{238}U do 285 Bq/kg i ^{232}Th do 201 Bq/kg).

Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs su na većini ispitivanih lokalnosti manje od 20 Bq/kg, što je bio nivo kontaminacije našeg šireg područja prije akcidenta u Černobilju. Međutim, u Kusidama (VK-28, slojeviti i bankoviti krečnjaci) i Grahovu kod Nikšića (VK-22, fluvioglacijalni nanos), tehnogeni ^{137}Cs još uvijek je prisutan u značajnoj mjeri u površinskom sloju tla.

ZAKLJUČAK

Upravo u zoni Visoki krš nađeno je pet lokalnosti sa najvećim dozama zračenja u Crnoj Gori (iznad 130 nGy/h). Najveća jačina doze (192 nGy/h) izmjerena je na lokalnosti kod Virpazara, kojoj je u osnovi vulkanit andezitskog tipa, a uzrok joj je veoma visoka koncentracija K u tlu. Ostale četiri lokalnosti karakterišu izdanci boksita, gdje su relativno visoki sadržaji U i Th u tlu uzrok povećanog fona prirodnog zračenja.

Sve ove lokalnosti, u poređenju sa drugim poznatim područjima u svijetu sa visokim prirodnim fonom zračenja, spadaju u red onih sa umjerenim vrijednostima povećanja fona.

REFERENCE

[1] Mirković M, et al. Geološka karta SR Crne Gore, 1:200 000. Republička samoupravna zajednica za geološka istraživanja SRCG, Titograd, 1985.

[2] Živaljević M. Tumač geološke karte SR Crne Gore, 1:200 000. Posebna izdanja Geološkog glasnika, Knjiga VIII. Zavod za geološka istraživanja SRCG, 1989.

[3] Vukotić P, et al. Fon gama-zračenja u Crnoj Gori. Softverski program. MENEKO, Podgorica 1996.

[4] Vukotić P, et al. Background gamma-radiation in Montenegro. Proceedings of the IRPA Regional Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe; Prague, September 1997, p. 477-479.

[5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly of the United Nations with Scientific Annexes, New York, 2000.

LOCALITIES WITH ELEVATED RADIATION BACKGROUND IN THE HIGH KARST ZONE OF MONTENEGRO

Perko Vukotić[1], Ranko Svrkota[2], Tomislav Anđelić[3], Ranko Zekić[3] and Nevenka Antović[4]
[1]Montenegrin Academy of Sciences and Arts, [2]Geological Survey of Montenegro, [3]Centre for Ecotoxicological Research, [4]Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Podgorica, Montenegro
pvukotic@yahoo.com

Research aimed to find localities in Montenegro with an elevated terrestrial gamma background was conducted during the period 2008-2009. For this purpose, 138 localities which have geological formations known to contain minerals with potentially high concentrations of U, Th and K, were selected throughout the country for a dosimetric survey.

There are four distinctive geotectonic units in Montenegro: the Adriatic-Ionian Zone (JZ), the Budva-Cukali Zone (BZ), the High Karst Zone (VK), and the Durmitor Tectonic Unit (DTJ). The central and southern parts of Montenegro belong to the VK zone, whose geological structure is predominated by Mesozoic carbonate sediments, with occurrences of red and white bauxite formations, Triassic volcanic rocks, Paleogene flysch sediments and Quaternary sediments. In total, 38 localities belonging to the VK zone were selected for field investigations of terrestrial radiation.

Knowing from earlier investigations that in Montenegro the average absorbed dose-rate in the air, 1 m above the ground, is 55 nGy/h, it was arbitrarily adopted that only localities with absorbed doses at least 50 % above this average value would be considered as having a relatively elevated radiation background. Field measurements have shown that 12 of the surveyed localities in the VK zone have such elevated dose values, five of them being with the highest dose rates in Montenegro. Among these five sites, the highest dose rate (192 nGy/h) was found at a locality which lies on andesite volcanic rock, while the other four localities (131 – 149 nGy/h) lie on bauxite deposits. Compared to the other areas in the world known to have a high natural radiation background, all of these localities in Montenegro have a moderately elevated radiation level.

From the 12 localities with a relatively elevated radiation background, soil samples have been collected and analyzed by gamma spectrometry to determine activity concentrations of ^{40}K, ^{232}Th, ^{235}U, ^{238}U, ^{226}Ra and ^{137}Cs. Gamma spectrometry has revealed that a high content of ^{40}K (2329 Bq/kg) was the main source of elevated radiation at the site over andesite rocks, and high U and Th contents (up to 285 Bq/kg of ^{238}U, and up to 201 Bq/kg of ^{232}Th) at the sites over bauxite deposits.

DECREASE OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY AFTER TERMINATED RESTORATION OF THE URANIUM MINE SITE AT ŽIROVSKI VRH (SLOVENIA)

Milko J. Križman[1] and Jože Rojc[2]
[1]Slovenian Nuclear Safety Administration, Ljubljana, Slovenia
[2] Rudnik Žirovski vrh, Gorenja vas, Slovenia
milko.krizman@gov.si

INTRODUCTION

The uranium mining and milling complex at Žirovski vrh, located 45 km NW from Ljubljana, was in operation in the period 1985 – 1990 and produced about 452 tonnes of yellow cake. In parallel, over 0.6 million tonnes of technological tailings and 2.6 million tonnes of mine waste rock were generated and deposited on separate disposal sites in close vicinity of the mining site, with the total area of 10 hectares [1]. Both disposal sites are located on the slopes of the surrounding hills. The disposal sites were completely restored, mostly in the last decade. The processing plant, located in the Brebovščica valley, was decommissioned in the nineties. All provisional facilities were removed from the central site at Todraž and transferred to the mine waste deposit. The restoration works were finished in 2010, twenty years after the cessation of uranium production.

Radioactive discharges and radioactivity in the environment were monitored during operation of the uranium mine, continued during restoration phases and will be monitored a certain period afterwards. Uranium mining at Žirovski vrh had quite an essential impact to the environment, either evaluated as contamination of environmental media or as in the term of effective dose to the individual of the reference group. At nuclear facilities in Slovenia, such as at nuclear power plant, research reactor or storage of radioactive waste, environmental radioactivity levels practically have not been detected or recorded by monitoring appliances (with rare exceptions). Levels of radioactivity in the U-mine environment have been high enough to be determined easily from the very beginning, practically in all parts of the local biosphere of the Žirovski vrh site.

The aim of this paper is to present the radioactive discharges and enhanced levels of radioactivity in the nearby environment, monitored during the operation period of the U-mine and after terminated restoration

works. The most significant decreases of radioactivity after the restoration of the site were identified.

MATERIAL AND METHODS

Uranium ore at Žirovski vrh contained on average 0.8 – 0.9 g U_3O_8 per tonne of ore, with decay products being in the radioactive equilibrium. The radionuclide levels of the thorium decay chain and ^{40}K are similar as in the normal Earth crust. Uranium content in mine waste rock does not exceed 0.04 g/tonne. Radionuclides in hydro-metalurgical tailings from the ore processing plant were far from radioactive equilibrium: 1 Bq/g of ^{238}U, 8.7 Bq/g of ^{226}Ra, and 3.9 Bq/g of ^{230}Th [2]. Radionuclides in a natural soil in the surroundings are the following: 0.060 Bq/g of ^{238}U and ^{226}Ra, 0.055 Bq/g ^{232}Th and 0.50 Bq/g of ^{40}K.

Radioactive discharges from the U-mine facilities have been periodically controlled. Radon released from the mine exhaust vents and from the areas with deposited materials was measured regularly. The radionuclides of U-Ra decay chain in waters, such as mine, seepage and surface run-off water were determined, as well as gamma radiation from the off-site and on-site disposal areas.

Concentrations of radionuclides were determined in samples taken along atmospheric and water pathways. Control of atmospheric pathways covers monitoring of long-lived radionuclides, radon ^{222}Rn and its short-lived progeny at the near-ground atmosphere. Possible contamination of leafy vegetables from gardens and grass grown on and nearby disposal sites are also a part of the atmospheric transfer pathway. Monitoring programmes covering water pathway have comprised long-lived radionuclides (^{238}U, ^{226}Ra, ^{210}Pb) in surface streams, sediments and water biota. Radionuclides in air and waters have been determined monthly, in other samples quarterly or seasonally.

All radioactivity measured in the local environment has not to be attributed to uranium mining and milling. Only net values of radioactivity, i.e. with subtracted background levels, shall be estimated and evaluated as a mine contribution. Measurements of the natural radioactivity at the beginning or before the mine activities started had not been performed, so several locations for sampling, far from U-mine influence, were selected later as reference points.

A comparison was made for the period before restoration and for the present time when restoration works were completed. Discharged

radioactivity to the environment and environmental concentrations of the leading radionuclides of uranium-radium decay chain were considered.

RESULTS AND DISCUSSION

Radioactive discharges

The principal sources of radioactive atmospheric emissions (radon, radon progeny, aerosols with long-lived radionuclides) during the mine operation (1985 – 1990) were the exhaust vents of the mine. Sampling and measurement points of radioactive discharges are located in the nearby vicinity of the mine entrances and at both disposal sites. Emissions of radioactive particulates were not evaluated. In this period radon releases were estimated to around 22 TBq per year. In the period after the cessation of mining and milling activities radon releases were diminished to 12 TBq/y [1]. After 2005, the mine openings were closed air tightly and atmospheric radioactive discharges from the underground mine were terminated. Before restoration of all disposal sites with mine waste rocks (2006), the discharges from those areas (based on measurements of exhalation rates of radon) were estimated to nearly 7 TBq/y. The thick and complex cover over the disposal areas, constructed and tested in 2006 – 2009, reduced radon flux to the levels near natural background exhalation, i.e. to less than 0.1 Bq m^2/s. After final restoration of both disposal sites, Jazbec and Boršt (2009), radon releases to the atmosphere were reduced to only about 0.8 TBq per year (Table 1).

Final restoration of the underground mine did not reduce the discharges of uranium and radium via mine water. The discharges via percolation and run-off waters were significantly reduced after the construction of a final cover on both disposal sites, preventing the atmospheric and rear waters to penetrate into the body of the tailings. After operational period (1991) the annual discharge rates of radionuclides with mine water were 1.6 GBq ^{238}U and 43 MBq ^{226}Ra. These figures changed two decades later to 1.8 GBq^{238}U and 32 MBq^{226}Ra. With percolation water from both disposal sites about 1.4 GBq ^{238}U per year and 31 MBq ^{226}Ra per year were discharged. When restoration of the mine site was finalized in 2009, the annual discharged activities were lowered to 0.7 GBq ^{238}U and 16 MBq ^{226}Ra respectively [1].

External radiation on the bare surface of disposal site was 3 – 4 μSv/h on tailings and up to 0.5 μSv/h on waste rock pile [4]. The enhanced dose rate levels could be measured to the distances of some tens of metre. The thick complex cover was made of inert materials and reduced external

radiation down to the levels of 0.10 – 0.15 μSv/h. These values are below the authorised level for external dose rate of 0.2 μSv/h.

Table 1. Radioactive discharges from the U-mining and milling complex at Žirovski vrh during operation (1985 – 1990), before (1991 – 2005) and after final restoration (2009) [1].

Released radionuclide		**Annual activity**		
		during operation	**before restoration**	**after restoration**
Total atmospheric releases	^{222}Rn	22 TBq	12 TBq	0.8 TBq
Total liquid releases	^{238}U	4.6 GBq	3.0 GBq	2.5 GBq
	^{226}Ra	217 MBq	74 MBq	48 MBq

Radioactive discharges after restoration of the site were significantly reduced. In spite of that, the most of radionuclide concentrations in the environment are still enhanced if compared to the reference background levels. It will be still needed some years that former mine spaces and both finalised disposal sites will stabilize.

Radioactivity in the environment

Sampling and measurement points were distributed along the valleys of local streams (Brebovščica, Todraščica) and the river of Poljanska Sora. The most distant location is 4 km downstream the mining site. To monitor enhanced concentrations caused by liquid and atmospheric discharges from the mine here is still possible [3]. The typical averages of environmental radioactivity in certain media are shown in Table 2, for the main periods of the U-mine history. Concentrations in the environment during operation were compared with concentrations recorded at the end of restoration and also compared to natural background.

Air particulates in the mine environment originated from the transport of uranium ore and waste rock or crushing and processing uranium ore. Concentrations of long-lived radionuclides (^{238}U, ^{226}Ra, ^{210}Pb) in air particulates were reduced after the cessation of mining and milling activities for an order of magnitude, i.e. from some tens μBq/m^3 to some μBq/m^3 (to natural levels). After the re-arrangement of mine facilities and restoration of

the disposal sites, the mine contribution of air particulates could be related only to the re-suspension from the ground [6].

Radon and its decay products deriving from the U-mine delivered (and still deliver) the main part of the effective dose to the local population (70 – 80 %). About 330 people live in four settlements in the valley of Brebovščica stream. Most of radon comes from the Jazbec waste pile and from a ruined karstic terrain with the areas formerly shaped accordingly to the needs of mining and processing facilities. Radon emission points that were located at higher elevations (ventilations shafts, former disposal sites) had no impact to radon levels down in the valleys. Radon discharges to the environment decreased significantly after the closure of mine exhaust vents and after covering the disposal sites with clayey barrier and a cover of natural inert material of thickness of 2 metres. Enhancement of radon concentrations in the main valley during operation was estimated to 7 – 9 Bq/m^3 and decreased after restoration to only about 3 – 4 Bq/m^3 [3,4]. The latter levels are hardly to establish since they are of the same order of magnitude as long term averages of natural levels of radon. A background value for radon concentrations in the area is around (25 ± 5) Bq/m^3. The outdoor radon level in Slovenia was estimated to about 10 – 15 Bq/m^3 [7]. During the mine operation, the radon contribution could be ascertained and monitored at the distances of some kilometres, while after restoration of the site the enhanced radon concentrations could be confirmed at maximum up to 2 km from the site (Dolenja Dobrava).

A significant reduction of radioactive liquid discharges diminished also radioactivity of surface waters and sediments in both recipient streams Brebovščica and Todraščica. Concentrations of ^{238}U and ^{226}Ra are still higher as in natural waters while the values of other radionuclides of U-Ra decay chain are low (see Table 2). Radioactivity of mine water remains nearly the same as before the mine restoration [1]. Concentrations of radionuclides in local streams depend on annual and seasonal amount of precipitation, their form and intensity. Local people do not use water from streams for drinking, land watering and for cattle. Radioactivity of stream sediments was firstly reduced when the water cleaning device was put into operation in 1987 (100 tonnes of fine particles per months precipitated from mine water). Restoration of disposal sites limited a water transport of solid particles from those areas, what resulted in a relatively low content of radioactivity in sediments. Water biota (fish) has very low contents of ^{226}Ra and ^{210}Pb, rather comparable to those from uncontaminated surface waters.

Table 2. Environmental concentrations in the surroundings of the U-mine site at Žirovski vrh during operation (1985 – 1990) and at the end of restoration (2005 – 2010)

Sample and radionuclide		**Concentrations**		
		during operation	**end of restoration**	**at reference points****
Air particulates	^{238}U	0.03-0.12 mBq/m^3	0.005-0.020 mBq/m^3	0.005 mBq/m^3
	^{226}Ra	0.01-0.08 mBq/m^3	0.005-0.020 mBq/m^3	0.005 mBq/m^3
	^{210}Pb	0.5-1.3 mBq/m^3	0.5-1.0 mBq/m^3	0.5 mBq/m^3
Radon	^{222}Rn	10-40 Bq/m^3	10-30 Bq/m^3	10-25 Bq/m^3
^{222}Rn contribution		7-9 Bq/m^3	3-4 Bq/m^3	–
Rn-progeny, EEC ^{222}Rn		5-25 Bq/m^3	5-15 Bq/m^3	5-15 Bq/m^3
Surface water*	^{238}U	120-370 Bq/m^3	60-130 Bq/m^3	5 Bq/m^3
	^{226}Ra	12-30 Bq/m^3	3-7 Bq/m^3	3-5 Bq/m^3
	^{210}Pb	2-10 Bq/m^3	2-10 Bq/m^3	2 Bq/m^3
Sediments*	^{238}U	180-420 Bq/kg	50-60 Bq/kg	50 Bq/kg
	^{226}Ra	250-600 Bq/kg	80-90 Bq/kg	50-60 Bq/kg
	^{210}Pb	250-600 Bq/kg	50-120 Bq/kg	50-60 Bq/kg

* Brebovščica and Todraščica stream
** the valley of Sora or the stream of Sora, as appropriate

Dispersion of radioactive aerosols to the agricultural areas in the surroundings was limited due to partly wooded local regions. Any significant contamination of leafy vegetables, wild berries, milk and eggs was rarely found even in the operational period of the U-mine. Before restoration, only grass grown directly on the disposal areas steadily showed higher contents of ^{226}Ra and ^{210}Pb, but it was forbidden to use hay from those areas as feeding stuffs. Only during the operational period of the U-mine, bioindicators (lichens) gave an indication of higher air activity in the local area as elsewhere.

External radiation at the Žirovski vrh site depends on geological composition of the ground and natural radioactivity of these materials. As a cover layer for both disposal sites local material was used, but for radon barrier a clayey material was transported from a more distant location. The radiation fields in the vicinity of the sites were reduced to the natural levels of external radiation.

CONCLUSION

The results of environmental radioactivity monitoring showed that radioactivity steadily decreased according to the different phases of the mine decommission. After restoration, radioactivity levels on the site and in close vicinity are approaching to the background levels, except for radon in air and for waters. Consequently, radiation exposure to the reference groups of the population decreased from 0.3 – 0.4 mSv per year during operation to about 0.1 mSv per year after finalized restoration works [3]. This figure is much lower than the authorised limit of 0.3 mSv per year, set by the Slovenian competent authority.

Still enhanced levels of radioactivity were found in surface waters and sediments, in radon concentrations in the very vicinity of disposal sites. Radon exhalation rate and external radiation from the disposal sites do not differ from the natural level; their enhancement could be expected only in case of destruction of protective covering layer.

In future, the impact of the restored areas will exist further and will depend mainly on quality of implemented technical measures, regular monitoring and regular maintenance of disposal sites. On the other side, it will depend also on meteorological and climate conditions. In some years, the regular monitoring will pass on a long term institutional supervision.

REFERENCES

[1] Rojc J. Radiation protection and the impact of the uranium mine to the environment, Annual reports for 2005, 2006, 2007, 2008 and 2009, Žirovski Vrh Mine, (in Slovene), RŽV, Todraž, 2006-2010.

[2] Križman M, Byrne A R, Benedik L. Distribution of ^{230}Th in milling wastes from the Žirovski vrh uranium mine (Slovenia), and its radioecological implications. J Environ Radioact 1995;26/3:223-235.

[3] Omahen G. Radioactivity monitoring in the environment of uranium mine at Žirovski Vrh, Annual reports for 2005, 2006, 2007, 2008 and 2009 (in Slovene), ZVD, No. CFM-49/2010-GO, Ljubljana, 2006-2010.

[4] Križman M J. Planning for environmental restoration of contaminated sites in Slovenia. IAEA-TECDOC-865, Vol. 2, Vienna, 1996, pp. 197-218.

[5] Križman M J, Rojc J, Jovanovič P. Radon levels after restoration of the U-mine disposal site. Nukleonika 2010;55/4:523-527.

[6] Slovenian Nuclear Safety Administration (SNSA). Annual Reports on Radiation Protection and Nuclear safety in the Republic of Slovenia for 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, (in Slovene), extended version, SNSA, Ljubljana, 2006-2010.

[7] Vaupotič J, Kobal I, Križman M. Background outdoor radon levels in Slovenia. Nukleonika 2010;55/4:579-582.

CONTENT OF NATURAL RADIONUCLIDES IN SEDIMENTS IN THE VICINITY OF A FORMER URANIUM MINE

Marko Štrok, Petra Planinšek and Borut Smodiš
Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia
marko.strok@ijs.si

INTRODUCTION

Former Slovenian uranium mine Žirovski vrh lies in the subalpine environment with relative high rainfall and population density. As a legacy of uranium mining, Jazbec and Boršt waste piles were constructed in the vicinity of a former uranium mine. On the Jazbec waste pile, about 2.5 millions of tons of spoil, and 0.05 millions of tons of red mud were deposited [1]. Average activity concentrations in spoil are 750 Bq/kg for ^{238}U, ^{226}Ra and ^{230}Th, and in red mud 495 Bq/kg for ^{238}U, 190 Bq/kg for ^{226}Ra and 65100 Bq/kg for ^{230}Th [2]. On the Boršt waste pile, about 0.6 millions of tons of uranium mill tailings (UMT) were deposited [1]. Average activity concentrations in UMT are 995 Bq/kg for ^{238}U, 8630 Bq/kg for ^{226}Ra and 3930 Bq/kg for ^{230}Th [2]. Seepage waters with elevated radionuclide concentrations from both waste piles flow in the nearby streams Brebovščica and Todraščica as it is shown in Figure 1. Todraščica outfalls into the Brebovščica and Brebovščica into the Poljanska Sora River (Figure 1).

Due to the different biogeochemical processes, natural radionuclides from both waste piles can be transferred to the sediments of the affected streams. These processes are mainly driven by the sorption onto the particles and particles settling or by the direct diffusion to sediments [3]. Therefore the aim of this work was to find out at which extent these processes occur in the specific case by comparing activity concentrations in sediments before and after inflow of seepage waters from both waste piles.

In sediment samples, ^{238}U, ^{234}U, ^{230}Th, ^{226}Ra, ^{210}Pb and ^{210}Po activity concentrations were determined, using radiochemical separations followed by either alpha spectrometry or proportional counting.

Figure 1. Sediment sampling sites

MATERIAL AND METHODS

Samples were collected at the locations indicated by numbers in the Figure 1. Sampling locations 1, 3 and 5 are located before influential area of both waste piles and locations 2, 4 and 6 after. About 1 kg of sediment sample was collected with sediment traps or by hand, where collecting by sediment traps was not possible. After sampling, sediments were dried at 60 °C, afterwards sieved through 1 mm screen sieve, homogenized and stored until analysis.

Radiochemical separation procedure for ^{238}U, ^{234}U, ^{230}Th and ^{226}Ra is outlined below and detailed procedure can be found in [4]. Dried sample was firstly ashed at 650 °C in a muffle furnace to remove organic matter from the sample. After that, the sample was melted with Na_2O_2 and Na_2CO_3 at 900 °C. Then ^{232}U, ^{229}Th and ^{133}Ba tracers were added. This sample was then dissolved by the addition of conc. HNO_3, and transferred into a Teflon beaker. Then the sample was further digested by the addition of conc. HCl,

conc. HNO_3, conc. HF and H_2O_2. Finally, conc. H_2SO_4 was added and evaporated until incipient dryness.

After final evaporation, radionuclides were co-precipitated as $Fe(OH)_3$ with the addition of ammonia and Fe^{3+} ions. After washing, precipitate was dissolved with 3 M HNO_3 / 1 M $Al(NO_3)_3$ and thorium was separated from uranium and radium on the TEVA separation column.

The uranium and radium-containing eluate, which was left from the separation on TEVA column, was transferred onto the UTEVA separation column, where uranium was separated from radium.

Radium and barium were co-precipitated from the radium-containing eluate with $PbSO_4$. Then the precipitate was dissolved with 0.1 M EDTA / 0.5 M NaOH. Afterwards $Ba(Ra)SO_4$ precipitate was formed by a consecutive addition of Ba carrier pH 0–5 indicator, 1:1 acetic acid, saturated solution of Na_2SO_4 and 0.125 mg/mL $BaSO_4$ substrate. After 30 min, the solution was filtered through the 0.1 µm filter. Finally, the filter was dried and mounted on a stainless steel disc and dried again.

Thorium was microprecipitated from the thorium-containing eluate with NdF_3. Uranium from the uranium-containing eluate was firstly reduced with 15 % $TiCl_3$ and then microprecipitated with NdF_3. Both thorium and uranium microprecipitates were placed for 30 min into an ice bath prior to filtration. Filtration was carried out through the 0.1 µm filter that was previously rinsed twice with 10 µm/mL NdF_3 substrate solution. Finally, the filter was mounted on a stainless steel disc and dried.

In a similar manner as for uranium, thorium and radium, ^{210}Pb was also extracted using a radiochemical separation procedure adopted from [4] and is therefore only briefly summarised here. Firstly, Pb tracer was added to the sediment sample and then the sample was digested with conc. HNO_3, conc. HCl and H_2O_2. After digestion, sample was evaporated and dissolved in 2 M HCl and Pb was separated out on the Sr Resin separation column. Then, the lead-containing eluate was evaporated to dryness, dissolved with deionised water and a $PbSO_4$ precipitate was formed by the addition of conc. H_2SO_4. Subsequently, the precipitate was transferred to the counting planchette, dried and weighed to gravimetrically determine radiochemical recovery.

For the radiochemical separation of ^{210}Po, ^{209}Po tracer was added to determine radiochemical recovery. Then the sample was digested overnight at room temperature with addition of 25 mL of conc. HNO_3 and 5 mL of conc. HCl. The next day, the sample was digested for 30 min at 200 °C. After cooling down, 10 mL of H_2O_2 were added and heated for 10 min at

100 °C. When the sample was cooled to the room temperature, it was filtered through the black ribbon filter paper. The residue was again introduced into the Erlenmeyer flask and the whole digestion procedure was repeated. Both filtrates were combined and evaporated until dryness at 100 °C. Then, 2 mL of conc. HCl was added and the sample was again evaporated until dryness. This step was repeated one more time. After that, 2 mL of conc. HCl, 0.5 g of ascorbic acid and 0.5 g of hydroxylammonium chloride were added and the sample diluted up to 100 mL with deionised water. Po was spontaneously deposited onto silver disc at 80 °C for 4 h.

^{238}U, ^{234}U, ^{230}Th, ^{226}Ra and ^{210}Po were measured in a Canberra Alpha Analyst alpha spectrometry system with PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon) detectors. Radiochemical recovery for ^{226}Ra was determined via ^{133}Ba measurement on HPGe spectrometer. ^{210}Pb was measured in a low-background gas-flow proportional counter, which was previously calibrated to take into account self-absorption and ^{210}Bi in-growth [5].

RESULTS

The results for analyzed radionuclides are shown in Figures 2 – 4. Activity concentration for ^{238}U was in the range from 28.7 – 72.6 Bq/kg, for ^{234}U 25.0 – 69.2 Bq/kg, for ^{230}Th 37.3 – 85.0 Bq/kg, for ^{226}Ra 40.3 – 135 Bq/kg, for ^{210}Pb 16.5 – 56.0 Bq/kg and for ^{210}Po 12.9 – 56.1 Bq/kg.

It is evident from Figures 2 – 4 that activity concentrations of all radionuclides in locations 1 and 3, which are located before influential area of the both waste piles (Figure 1), are lower comparing to the locations 2 and 4. This means that the sediment from Brebovščica and Todraščica streams is affected by the waste piles. However, this is not the case for Poljanska Sora river, where activity concentrations of ^{238}U, ^{234}U, ^{230}Th and ^{226}Ra after the inflow of Brebovščica stream (location 6) are either lower or equal to the sediment sample taken before inflow of Brebovščica stream (location 5).

There are two possible reasons for that. First is that the influence of both waste piles on the activity concentrations in the Poljanska Sora is not so significant, because Poljanska Sora water flow is much higher than that of Brebovščica. This causes dilution of radionuclides in Poljanska Sora and consequently reduces activity concentrations. The other reason is that the location 6 is located after the outfalls of municipal wastewaters. This is evident also from the mass loss on the ignition, which was for the sediment sample from location 6 about 62 %, whereas for all other locations from 7 % to 9 %. Most probably, activity concentrations of ^{238}U, ^{234}U, ^{230}Th and ^{226}Ra

in the organic matter from the municipal wastewaters is lower comparing to that in sediments, which reduces activity concentrations in sediments. Interestingly, ^{210}Pb and ^{210}Po activity concentrations in Poljanska Sora were higher after the inflow of Brebovščica. This could be probably attributed to the atmospheric deposition of these two radionuclides on the foodstuffs and consequently higher activity concentrations in organic matter from municipal wastewaters comparing to ^{238}U, ^{234}U, ^{230}Th and ^{226}Ra. Nevertheless, more research is needed to prove this explanation.

Figure 2. ^{238}U and ^{234}U activity concentrations in sediments

Figure 3. ^{230}Th and ^{226}Ra activity concentrations in sediments

Figure 4. ^{210}Pb and ^{210}Po activity concentrations in sediments

CONCLUSION

Results of the content of natural radionuclides in sediments in the vicinity of a former uranium mine showed that activity concentrations of all analyzed radionuclides were higher in sediments after the inflow of seepage waters from waste piles in Brebovščica and Todraščica stream. This was not the case for Poljanska Sora River, where activity concentrations of ^{238}U, ^{234}U, ^{230}Th and ^{226}Ra in sediments were equal or lower because of the effect of municipal wastewaters and dilution of radionuclides.

Acknowledgment

This study was supported by the Slovenian Research Agency (Grant no. P2-0075)

REFERENCES

[1] Florjančič A P. Rudnik urana Žirovski vrh. Radovljica, Didakta, 2000. ISBN 961-6363-00-X (in Slovene).

[2] Križman M, Byrne A R, Benedik L. Distribution of ^{230}Th in milling wastes from the Žirovski vrh uranium mine (Slovenia), and its radioecological implications. J Environ Radioact 1995;26:223-235.

[3] Stricht E V D, Kirchmann R. Radioecology, radioactivity & ecosystems. Liege, Fortempts, 2001. ISBN 2-9600316-0-1.

[4] Štrok M, Smodiš B, Petrinec B. Natural radionuclides in sediments and rocks from Adriatic Sea. J Radioanal Nucl Chem 2010;286:303-308.

[5] Štrok M, Repinc U, Smodiš B. Calibration and validation of a proportional counter for determining beta emitters. J Power Energy Systems, 2008;2:573-81.

^{137}Cs NA ZNANSTVENO – ISTRAŽIVAČKOM POLIGONU "ŠUMBAR"

Božena Skoko[1], Gordana Marović[1], Dinko Babić[1] i Ivan Vicković[2]
[1]Jedinica za zaštitu od zračenja, [2]Jedinica za toksikologiju
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
bskoko@imi.hr

UVOD

Jedinica za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada od 2009. godine provodi program mjerenja radioaktivnosti na znanstveno-istraživačkom poligonu "Šumbar", sa svrhom prikupljanja podataka o stanju kontaminacije tog područja. Poligon se nalazi u blizini Karlovca, površine je 2153 ha, a na njemu dominira šumska zajednica hrasta lužnjaka (*Quercus robur*) i graba (*Carpinus betulus*). Osim šuma, poligon sadrži nekoliko manjih livada te glinište.

Dinamika kontaminacije šuma može se promatrati u dvije faze. Prva, "rana faza", traje 4 – 5 godina. Karakterizirana je brzom redistribucijom radionuklida između drveća i tla budući da se početni *fall-out* velikim dijelom zaustavi na krošnjama drveća. Druga, "mirna faza", karakterizirana je sporim promjenama u biodostupnosti radionuklida, a kontaminacija drveća ovisi o prijenosu radionuklida korijenjem u drvnu masu. Ugradnjom u biljnu masu, radionuklidi sudjeluju u životnom ciklusu šume i tako ostaju dugo prisutni u ekosustavu. Upravo zato, i zbog radionuklida dugog vremena polurasprada, jednom kontaminirani šumski ekosustavi postaju dugotrajan izvor kontaminacije za populaciju koja u prehrani sadrži veći udjel šumskih plodova, gljiva i mesa divljači. Istraživanja nakon černobilske nesreće pokazala su puno veću varijabilnost koncentracija aktivnosti radionuklida u raznim sastavnicama šumskih područja (tlo, biljke, životinje) u odnosu na obradive površine. Posebno je naglasak na ^{137}Cs koji ima najveću varijabilnost u kretanju od svih radionuklida. Zbog debljih organskih slojeva, velike mikrobne i micelijske biomase te gustog površinskog sustava korijenja šumskog tla, cezij ima sporiju vertikalnu migraciju u šumskom tlu u odnosu na obradivo tlo. Samo "site-specific" istraživanja mogu dati uvid u stvarne puteve i prijenose radionuklida u takvim ekosustavima [1,2].

Kao pregled stanja kontaminacije u znanstveno-istraživačkom poligonu "Šumbar", istražene su koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u tlu i travi te poznatim biondikatorima, mahovini i gljivama [3,4]. Osim bioindikatorske uloge, mahovine i gljive mogu direktno ili indirektno sudjelovati u prehrambenom lancu čovjeka. Indirektno kao izvor hrane divljači u jesenskim i zimskim mjesecima ili direktno (gljive) kroz povećanu zastupljenost u prehrani ljudi u jesenskim mjesecima [5]. Nasumično su određena tri mjesta uzorkovanja (označena kao A, B i C) s obzirom na pristupačnost terena. Lokacija A se nalazi u dijelu šume koji je blizu autoputa Zagreb – Karlovac, lokacija B je smještena bliže kanalu Kupa – Kupa, a lokacija C se nalazi na rubnom šumskom pojasu. Veličina terena te mjesta uzorkovanja prikazana su na Slici 1. Ovaj rad prikazuje rezultate preliminarnih istraživanja radioaktivnosti na znanstveno-istraživačkom poligonu "Šumbar".

Slika 1. Znanstveno – istraživački poligon "Šumbar", modificirano prema http://maps.google.com/

MATERIJALI I METODE

Uzorkovanje je provedeno u periodu 2009. – 2010. godine. Na svim lokacijama uzorkovano je tlo, trava (*Carex sp.*, nadzemni dio) i mahovina s drveća. Gljive su skupljene na cijelom području poligona.

Skupljeni uzorci tla, mahovine, trave i parazitskih gljiva sušeni su na 105 °C, homogenizirani, a potom spaljeni na 450 °C. Ovisno o volumenu, uzorci su pakirani u posudice od 100 mL, 200 mL ili 1000 mL (Marinelli

posude). Uzorci jestivih gljiva mjereni su u svježem stanju. Dio gljiva kojih nije bilo u dovoljnoj količini za samostalno mjerenje spojen je u zbirni uzorak, no pazilo se da se odvoje jestive od nejestivih biljaka. Uzorci koji nisu mogli biti odmah pripremljeni ili mjereni čuvani su u hladnjaku na -18 °C.

Svi uzorci obrađeni su visokorezolucijskom gamaspektrometrijom; Ge(Li) detektorom ORTEC rezolucije 1,78 keV na 1,33 MeV ^{60}Co i relativne efikasnosti od 16,8 % na 1,33 MeV; HPGe detektorom ORTEC rezolucije 2,2 keV na 1,33 MeV ^{60}Co i relativne efikasnosti od 74 % na 1,33 MeV ^{60}Co, povezanima s elektroničkim sustavom i osobnim računalom. Kalibracija efikasnosti načinjena je standardima Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) i Svjetske zdravstvene organizacije (WHO). Vrijeme mjerenja je 80000 s ili duže, ovisno o aktivnosti uzorka.

REZULTATI I RASPRAVA

Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u tlu, travi i mahovini prikazane su u Tablici 1. Svi rezultati izraženi su kao koncentracije aktivnosti suhe tvari. Srednja vrijednost aktivnosti ^{137}Cs u tlu je (123 ± 9) Bq kg^{-1} za lokacije A i B, u skladu s očekivanjima o većem prisustvu radionuklida u šumama, dok je za lokaciju C vrijednost za red veličine manja ((16,1 ± 0,5) Bq kg^{-1}), vjerojatno zbog položaja lokacije na rubnom dijelu šume. Ta vrijednost je usporediva i istog je reda veličine kao i ona zagrebačkog neobrađenog tla ((14,9 ± 2,3) Bq kg^{-1}) [6].

Tablica 1. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u tlu, travi i mahovini.

Lokacija	**^{137}Cs** (Bq kg^{-1})		
	Tlo	**Trava**	**Mahovina**
A	129 ± 2	13,2 ± 0,1	8,7 ± 0,2
B	117 ± 1	0,48 ± 0,01	57,8 ± 0,3
C	16,1 ± 0,5	0,43 ± 0,03	11,3 ± 0,2

Vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u uzorcima trave kreću se u rasponu od (0,43 ± 0,03) Bq kg^{-1}do (13,2 ± 0,1) Bq kg^{-1}, a za mahovinu od (8,7 ± 0,2) Bq kg^{-1}do (57,8 ± 0,3) Bq kg^{-1}. Rezultati aktivnosti cezija u travi sa sjevernog područja Hrvatske iznose 2 Bq kg^{-1} u 2009. godini [6].

U Tablici 2 prikazani su rezultati koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u različitim vrstama te zbirnim uzorcima gljiva. Izmjerene koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u pojedinim vrstama jestivih gljiva kreću se u rasponu između (4,1 ± 0,5) Bq kg^{-1} do (610 ± 5) Bq kg^{-1}. Najnižu vrijednost pokazuje maglenka (*Clitocybe nebularis*), a najvišu vitka korenovka (*Gymnopus dryophilus*, prije pod nazivom *Collybia dryophila*). Najveća izmjerena koncentracija aktivnosti ^{137}Cs ((1160 ± 120) Bq kg^{-1}) je u zbirnom uzorku koji je sadržavao suvišak jestivih gljiva navedenih u Tablici 2 (osim *Macrolepiota procera*) te još nekih drugih vrsta kojih nije bilo u dovoljnoj količini za samostalan uzorak. U zbirnom uzorku nejestivih gljiva, koji je u najvećem udjelu (82 %) sadržavao vrstu kresivna guba (*Fomes fomentarius*), a u manjem udjelu brezinu gubu (*Piptorous betulinus*), sjajnu hrastovku (*Ganoderma lucidum*), žuti kruh (*Polyporus sulphurus*) te šarenu tvrdošku (*Trametes versicolor*), izmjerena je koncentracija aktivnosti ^{137}Cs ispod donje granice detekcije.

Tablica 2. Opis vrsta gljiva te koncentracija aktivnosti ^{137}Cs

Latinski naziv	**Lokalni naziv**	**Jestivost**	**Tip**	**^{137}Cs** (Bq kg^{-1})
Clitocybe nebularis	Maglenka	Jestiva	Saprofit	4,1 ± 0,4
Macrolepiota procera	Sunčanica	Jestiva	Saprofit	4,9 ± 0,9
Gymnopus dryophilus	Vitka korenovka	Jestiva	Saprofit	610 ± 5
Boletus (Xerocomus) badius)	Kostanjevka	Jestiva	Simbiot	190 ± 3
Amanita fulva	Smeđa preslica	Jestiva	Simbiot	223 ± 4
	Zbirni uzorak	/	Saprofit/Simbiot	1164 ± 10
	Zbirni uzorak	Nejestivo	Parazit	< 0,026

Rezultati koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u gljivama pokazuju očekivanu varijabilnost između različitih vrsta. Izrazito niska aktivnost uzorka parazitskih gljiva bila je očekivana budući da je podloga za rast tih vrsta gljiva drvo, koje u pravilu sadržava puno niže koncentracije aktivnosti od zemlje ili humusa. [2] Iako drugi autori navode vrstu *Xerocomus (Boletus) badius* kao najvećeg "sakupljača" ^{137}Cs, ovi rezultati pokazuju da na području "Šumbara" tu ulogu ima vrsta *Gymnopus dryophilus* [7,8].

ZAKLJUČAK

Rezultati preliminarnih istraživanja radioaktivnosti na znanstveno-istraživačkom poligonu "Šumbar" ukazuju na varijabilnost rezultata aktivnosti ^{137}Cs u šumskom ekosustavu. Daljnim proširenim istraživanjima bi se moglo detaljnije razjasniti trendovi kretanja ^{137}Cs u takvim sustavima te uzroci varijabilnosti koncentracija aktivnosti ^{137}Cs.

ZAHVALA

Ovaj rad je ostvaren uz financijsku potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske (Projekt 022-0222882-2335, Radioaktivnost okoliša i zaštita od zračenja,). Autori zahvaljuju Jasminki Senčar, Stjepanu Begi i Josipu Tončiću, dr. vet. med., na pomoći u istraživanju.

LITERATURA

[1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series No. 472. Vienna: IAEA; 2010.

[2] Calmon P, Thiry Y, Zibold G, Rantavaara A, Fesenko S, Orlov O. Radionuclide transfer in forest ecosystems. In: Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments, TECDOC-1616. Vienna: IAEA; 2010. str. 333-381.

[3] Marović G, Franić Z, Senčar J. Mahovina u radiološkom monitoringu. U: Barišić D, Grahek Ž, Krajcar Bronić I, Miljanić S, ur. Zbornik radova Sedmog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja; 29.-31. svibnja 2008; Opatija; Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2008. str. 230-234.

[4] Marović G, Franić Z, Senčar J, Bituh T, Vugrinec O. Mosses ans some mushroom species as bioindicators of radiocesium contamination and risk assessment. Coll Antropol 2008; 32: 109-114.

[5] Vilić M, Barišić D, Kraljević P, Lulić S. ^{137}Cs concetration in meat of wild boars (*Sus scrofa*) in Croatia a decade and half after the Chernobyl accident. J Environ Radiactivity 2005;81:55-62.

[6] Praćenje stanja radioaktivnosti životne sredine u Republici Hrvatskoj za 2009. godinu. Izvještaj IMI-CRZ-90, Zagreb; 2010.

[7] Malinowska E, Szefer P, Bojanovski R. Radionuclides content in *Xerocomus badius* and other commercial mushrooms from several regions of Poland. Food Chemistry 2006;97:19-24.

[8] Kalač P. A review of edible mushroom radioactivity. Food Chemistry 2001;75:29-35.

^{137}Cs IN RESEARCH POLYGON "ŠUMBAR"

Božena Skoko[1], Gordana Marović[1], Dinko Babić[1] and Ivan Vicković[2]
[1]Radiation Protection Unit, [2]Toxicology Unit
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
bskoko@imi.hr

In 2009, Radiation Protection Unit of the Institute for Medical Reseach and Occupational Health started a radioactivity measurement programme in research polygon "Šumbar". The purpose of these investigations is to collect as many data as possible about the contamination of the polygon that is mainly covered by a forest of English oak (*Quercus robur*) and hornbeam (*Carpinus betulus*). Once contaminated, forests represent long-term sources of radiation exposure to specific population groups which are using them as a source of foodstuffs. After the Chernobyl accident, researchers have shown that there has been more variability in radionuclide activity concentration in forests than in agricultural ecosystems. In order to carry out a radioactivity screening of the polygon, we randomly chosed three sampling sites for collecting soil, grass and moss samples. Different species of mushrooms were collected over the whole polygon area. The average activity concentration of ^{137}Cs in soil for two sampling sites is (123 ± 9) Bq kg^{-1}, while the result for the third site is lower by an order of magnitude ((16.1±0.5) Bq kg^{-1}). The activity concentration of ^{137}Cs in grass samples ranges from (0.43 ± 0.03) Bq kg^{-1} to (13.2 ± 0.1) Bq kg^{-1}, and in moss samples from (8.7 ± 0.2) Bq kg^{-1} to (57.8 ± 0.3) Bq kg^{-1}. In five collected mushroom species, the activity of ^{137}Cs is in the range between (4.1 ± 0.5) Bq kg^{-1} and (610 ± 5) Bq kg^{-1}, the lowest and the highest values referreing to *Clitocybe nebularis* and *Gymnopus dryophilus*, respectively. Parasitic mushrooms exhibit activity below the minimum detection level. Our preliminary results show and confirm variability of the activity concentration of ^{137}Cs in different parts of this ecosystem.

RADIOAKTIVNOST I MOGUĆA ISKORISTIVOST FOSFOGIPSA

Tomislav Bituh[1], Ivica Prlić[2], Gordana Marović[1], Jasminka Senčar[1] i Branko Petrinec[1]
[1]Jedinica za zaštitu od zračenja
[2]Jedinica za dozimetriju zračenja i radiobiologiju
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
tbituh@imi.hr

UVOD

Proizvodnja fosfatnih mineralnih gnojiva i njen utjecaj na čovjeka i okoliš predmet je sustavnog istraživanja i praćenja putova širenja prirodne radioaktivnosti tijekom proizvodnje, prerade i odlaganja otpada s povišenom prirodnom radioaktivnosti.

Fosfogips je otpadni materijal koji nastaje tijekom proizvodnje fosforne kiseline i fosfatnih mineralnih gnojiva. Fosfatna ruda, sirovina koja se koristi u postupku, ovisno o podrijetlu, sadrži povišenu prirodnu radioaktivnost (*Naturally Occurring Radioactive Material* – NORM) radionuklida uranijevog i torijevog prirodnog radioaktivnog niza.

U procesu proizvodnje fosfatnih mineralnih gnojiva prirodni ^{238}U uglavnom se zadržava u proizvodima, dok se njegov potomak ^{226}Ra, jedan od najtoksičnijih radionuklida prirodnog podrijetla, potpuno ugrađuje u fosfogips zamjenjujući Ca u kemijskoj strukturi. U mokrom postupku (postupak sa sumpornom kiselinom) na svaku tonu fosfatne rude koja uđe u proces nastane oko 5 tona fosfogipsa koji se odlaže na odlagalište. Time se fosfogips definira kao NORM materijal kojem je tehnološkim postupcima povišena prirodna radioaktivnost [1-4].

Kemijski, fosfogips je sastavljen uglavnom od $CaSO_4 \times 2H_2O$ (95,62 %), dok ostatak čine neproreagirani fosfati (1,4 %), neotopljeni fluorosilikati (1,25 %), zaostali topivi P_2O_5 (0,36 %), te minerali i organske tvari (< 1 %).

Odlagalište fosfogipsa smješteno je oko 5 km južno od tvornice i nalazi se na granici Parka prirode Lonjsko polje. Sastoji se od četiri kazete ukupne površine oko 1,6 km^2, te dubine oko 4 m (Slika 1). Kapacitet odlagališta je 16 milijuna tona, dok je trenutno odloženo oko 4 milijuna tona fosfogipsa [2].

Posljednjih nekoliko godina ispitivanja su usmjerena na iskoristivost fosfogipsa, s namjerom da ga se rabi za izradu temelja u cestogradnji, kao aditiv za beton, kod remedijacije rudnika, u proizvodnji sumpora te u agrikulturi [5,6].

Ekvivalent aktivnosti radija, Ra_{eq} (Bq/kg) je koeficijent koji pomoću jednog broja predstavlja koncentracije aktivnosti ^{226}Ra, ^{232}Th i ^{40}K, a izračunava se pomoću jednadžbe 1 [6]. Za sigurnu uporabu materijala u graditeljstvu, najviša dopuštena vrijednost Ra_{eq} mora biti manja od 370 Bq/kg.

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1{,}43 A_{Th} + 0{,}077 A_K \qquad (1)$$

gdje su A_{Ra} – koncentracija aktivnosti ^{226}Ra, A_{Th} – koncentracija aktivnosti ^{232}Th i A_K – koncentracija aktivnosti ^{40}K.

Preko vanjskog indeksa rizika, H_{ex} određene su granice koncentracija aktivnosti radionuklida u materijalima koji se rabe u graditeljstvu, a najveća vrijednost H_{ex} (koji se računa iz jednadžbe 2) odgovara gornjoj granici Ra_{eq} (370 Bq/kg). Kako bi rizik od zračenja bio nizak, H_{ex} mora biti manji od jedan.

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} < 1\,. \qquad (2)$$

Prema Pravilniku RH [7] radioaktivno onečišćenje graditeljskih materijala koji se upotrebljavaju u graditeljstvu mora udovoljavati uvjetu:

$$\frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200} + \frac{A_K}{3000} < 1 \qquad (3)$$

MATERIJALI I METODE

Uzorci fosfogipsa uzeti su na odlagalištu prema priloženoj mreži (Slika 1). Površinski uzorci uzeti su na 15 mjesta, dok su dubinski uzorci uzeti na 5 mjesta na dubinama od 50 cm, 100 cm, 150 cm i 200 cm. S obzirom na dostupnost mjesta uzimanja uzoraka isti su uzimani diskretno i rezultati su prikazani u 20 površinskih točaka. Svi uzorci sušeni su 24 – 72 sata na temperaturi od 105 ºC, homogenizirani i pakirani u hermetički zatvorene Marinelli posude od 1 L. Radi postizanja ravnoteže između radionuklida, uzorci su stajali najmanje 30 dana.

Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida ^{40}K, ^{226}Ra i ^{232}Th određene su gama-spektrometrijskim mjerenjem pomoću HP Ge i/ili Ge(Li)

detektora (rezolucije 1,78 keV na 1,33 MeV ^{60}Co, efikasnost 16,8 % i/ili rezolucja 1,56 keV na 1,33 MeV ^{60}Co, efikasnost 18,7 %) najmanje 80 000 sekundi. Kako je pri diskretnom uzimanju uzoraka na velikim površinama od istraživačkog interesa mjerna nesigurnost vrlo važan parametar pri raspravi rezultata, ista je izračunata standardnim postupkom, a faktor sigurnosti za proširenu mjernu nesigurnost je 2.

Slika 1. Mjesta uzimanja površinskih (1-15) i dubinskih uzoraka (16-20)

REZULTATI I RASPRAVA

U Tablici 1 prikazani su sumarni rezultati koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida ^{40}K, ^{226}Ra i ^{232}Th u uzorcima fosfogipsa. Vrijednosti koncentracije aktivnosti za ^{226}Ra na površini odlagališta kretale su se od 507 do 1054 Bq/kg i od 3,4 do 13,9 Bq/kg za ^{232}Th Vrijednost koncentracije aktivnosti za ^{40}K kretale od 7 do 23 Bq/kg. Ti rezultati sukladni su s literaturnim podacima [5,8-10]. Vrijednosti koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida dubinskih uzoraka ne pokazuju značajnu razliku u odnosu na uzorke uzete na površini što ukazuje da je horizontalno miješanje i razmještanje fosfogipsa na odlagalištu minimalno i da se je miješanje događalo uglavnom vertikalno utvrđivanjem nasipa.

Slike 2 i 3 prikazuju vrijednosti Ra_{eq} za površinske i dubinske uzorke. Vrijednosti pokazuju neujednačenu raspodjelu radioaktivnosti na površini i u dubinskim horizontalnim slojevima odlagališta. Razlog tome je neujednačena radioaktivnost početne sirovine tijekom višegodišnje proizvodnje fosfatnih mineralnih gnojiva kao i svakodnevna prekopavanja, ravnanja i utvrđivanja nasipa odlagališta.

Tablica 1. Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u uzorcima fosfogipsa

	Koncentracija aktivnosti ($A \pm 2\sigma$) [Bq/kg]		
	POVRŠINSKI UZORCI (n = 15)		
Radionuklid	**^{226}Ra**	**^{232}Th**	**^{40}K**
Maksimum	(1,05 ± 0,02)E+3	(1,39 ± 0,33)E+1	(2,30 ± 0,40)E+1
Minimum	(5,07 ± 0,10)E+2	(3,40 ± 0,70)E0	(7,00 ± 1,00)E0
	DUBINSKI UZORCI (n=20)		
Radionuklid	**^{226}Ra**	**^{232}Th**	**^{40}K**
Maksimum	(1,63 ± 0,03)E+3	(1,54 ± 0,21)E+1	(1,70 ± 0,30)E+1
Minimum	(1,28 ± 0,09)E+2	(3,10 ± 0,60)E0	(1,00 ± 0,10)E+1

Slika 2. Ra_{eq} za površinske uzorke fosfogipsa

Slika 3. Ra_{eq} za dubinske uzorke fosfogipsa

Vrijednosti vanjskog indeksa rizika (H_{ex}), izračunate prema uvjetu Pravilnika RH [7] u svim uzorcima s odlagališta, kretale su se od 0,49 do 5,5. Sve vrijednosti koje su veće od 1 pokazuju s kojeg dijela odlagališta se čisti fosfogips iz džepova s povišenom prirodnom radioaktivnosti ne smije koristiti u graditeljstvu. Međutim, ako fosfogips miješamo u povoljnom omjeru s drugim materijalima, radiološki neutralnim (koji nisu NORM), kako bi miješanjem (homogenizacijom fosfogipsa) H_{ex} bio manji od 1, moguće je takav, novi materijal koristiti i u graditeljstvu, a da rizik od izlaganja povišenoj prirodnoj radioativnosti ljudi i okoliša tom materijalu bude prihvatljiv. Valja istaknuti da je svaki tehnološki postupak koji bi opravdano koristio fosfogips na način da krajnji rezultat obrade bude novi proizvod, prihvatljiv i poželjan. Uvjet je da se na taj novi proizvod nametnu ograničenja propisana zaštitom od zračenja opće populacije tj. H_{ex} tog novog proizvoda mora biti manji od 1.

ZAKLJUČAK

Ispitivanje povišene prirodne radioaktivnosti odlaganog fosfogipsa nužno je radi neprekinutog praćenja radiološkog stanja odlagališta. Korisna uporaba fosfogipsa u graditeljstvu, agrikulturi ili u nekoj drugoj privrednoj grani smanjila bi (ili potpuno zaustavila) odlaganje fosfogipsa na odlagalištu. Poznavanje stanja radioaktivnosti na odlagalištu fosfogipsa nužno je i radi neprestane procjene radiološkog utjecaja odlagališta na ljude i okoliš.

ZAHVALA

Ovaj rad načinjen je u okviru projekata PHARE 2006 (EUROPEAID/125867/D/SER/HR) i MZOŠ 022-0222882-2335.

LITERATURA

[1] Prlić I. et al: Radiological characterization of Phosphogypsum Tailing Facility at Fertilizer Plant Kutina with comments on possible reuse of PG products PHARE 2006 – Development of hazardous waste management system, including the identification and management of "hot spot sites" in Croatia. EUROPEAID/ 125867/D/SER/HR. 2006.

[2] Bituh T, Marović G, Franić Z, Senčar J, Bronzović M. Radioactive contamination in Croatia by phosphate fertilizer production. J Hazard Mater 2009;162:1199-1203.

[3] Laiche TP, Scott LM. A radiological evaluation of phosphogypsum. Health Phys 1991;60:691-693.

[4] Perez-Lopez R, Alvarez-Valero AM, Nieto JM. Changes in mobility of toxic elements during the production of phosphoric acid in the fertilizer industry of Huelva (SW Spain) and environmental impact of phosphogypsum wastes. J Hazard Mater 2007;148:745-750.

[5] Papastefanou C, Stoulos S, Ioannidou A, Manolopoulou M. The application of phosphogypsum in agriculture ant the radiological impact. J Environ Radioact 2006;89:188-198.

[6] Beretka J, Mathew PJ. Natural radioactivity of Australian building materials, waste and by-products. Health Phys 1985; 48:87-95.

[7] Pravilnik o uvjetima, načinu, mjestima te rokovima sustavnog ispitivanja i praćenja vrste i aktivnosti radioaktivnih tvari u zraku, tlu, moru, rijekama, jezerima, podzemnim vodama, krutim i tekućim oborinama, vodi za piće, hrani i predmetima opće uporabe te stambenim i radnim prostorijama. Narodne novine 60/2008. http://narodne-novine.nn.hr .

[8] Rutherford P M, Dudas M J, Samek R A. Environmental impact of phosphogypsum. Sci Total Environ 1994;149:1-38.

[9] Abril J-M, Garcia-Tenorio R, Manjon G. Extensive radioactive characterization of a phosphogypsum stack in SW Spain: ^{226}Ra, ^{238}U, ^{210}Po concentrations and ^{222}Rn exhalation rate. J Hazard Mater 2009;164:790-797.

[10] Heijde, van der HB, Klijn PJ, Passchier WF. Radiological impacts of the disposal of phosphogypsum. Radiat Prot Dosim 1988;24:419-423.

RADIOACTIVITY OF PHOPHOGYPSUM AND ITS POSSIBLE USAGE

Tomislav Bituh[1], Ivica Prlić[2], Gordana Marović[1], Jasminka Senčar[1] and Branko Petrinec[1]
[1]Radiation Protection Unit, [2]Radiation Dosimetry and Radiobiology Unit
Institute for Medical Research and Occupational Heath, Zagreb, Croatia
tbituh@imi.hr

The production of phosphate fertilizers and its effects on human health and the environment are the subject of systematic investigation conducted by Radiation protection unit of the Institute for Medical Research and Occupational Health. During phosphate ore processing, practically all ^{226}Ra gets incorporated into phosphogypsum, which classifies it as technologically-enhanced NORM – Naturally Occurring Radioactive Material. In this paper natural radionuclides (^{40}K, ^{232}Th and ^{226}Ra) were measured gamma-spectrometricaly and the activity concentrations were calculated. Due to recent investigations which are focused on phosphogypsum usage in road construction, mine remediation, agriculture etc., radium equivalent (Ra_{eq}) and external hazard index (H_{ex}) were calculated.

AKTIVNOSTI ^{137}Cs U KESTENOVOM MEDU IZ SJEVEROZAPADNE HRVATSKE DVA DESETLJEĆA NAKON AKCIDENTA U ČERNOBILU

Martina Rožmarić Mačefat[1], Domagoj Barišić[2], Matea Rogić[1], Lidija Svečnjak[2], Marijana Nodilo[1], Dragan Bubalo[2], Marina Popijač i Nikola Kezić[2]

[1]Laboratorij za radioekologiju, Institut Ruđer Bošković, Zagreb

[2]Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

rozmar@irb.hr

UVOD

Radionuklidi, kao i ostali kationi iz tla, koji su bilo konstitutivni elementi/mikroelementi samih tala ili su pak u tla naknadno deponirani procesima suhog i mokrog taloženja uslijed globalnog onečišćenja atmosfere, mogu iz tla migrirati i ugraditi se u biljke. Dugogodišnje praćenje aktivnosti ^{137}Cs u nektarnim medovima ukazalo je na pojavu postupnog pada aktivnosti cezija u medu, odnosno na vrlo pravilno izražen pad transfera cezija iz tla u nektarne biljke tijekom vremena [1,2].

Sakupljajući nektar, pčele pokrivaju površinu od više desetaka km^2, posjećujući tijekom svakog izlaska iz košnice između 80 i 150 cvjetova. Kilogram meda pčele sakupe, ovisno o količini meda u mednom mjehuru, tijekom 100 000 do 150 000 izlazaka iz košnice [3]. Med u košnici predstavlja kompozitni uzorak sakupljen sa nekoliko stotina milijuna točaka i vjerojatno je jedan od najreprezentativnijih slučajnih uzoraka kojeg je moguće prikupiti u okolišu. Informacije sadržane u medu stoga najbolje reflektiraju prosječno stanje okoliša u pogledu biodostupnih elemenata ili spojeva [3]. Manje je pouzdano ako kontaminaciju pratimo analizom tla, jer je određujemo točkasto pa je za pouzdanije određivanje potreban puno veći broj uzoraka.

Umjetni radionuklid ^{137}Cs je najvećim dijelom u okoliš dospio kao posljedica atmosferskih testiranja nuklearnog oružja 50-ih i 60-ih godina XX. stoljeća te nakon nesreće u Černobilu 1986. godine. Procesima suhog i mokrog taloženja iz atmosfere, ^{137}Cs se s ostalim tvarima deponira na tlo iz kojeg ulazi u biljke. Transfer ^{137}Cs iz tla u biljke ovisi o brojnim faktorima, kao što su bioindikatorske osobitosti pojedinih biljnih vrsta, količina ^{137}Cs

deponiranog u tlu i količina slobodnog ^{137}Cs, količina organskog materijala, tip tla, pH vrijednost tla, vertikalna distribucija ^{137}Cs u tlu itd [4-9].

^{137}Cs se tijekom vremena veže za minerale tla te se resorpcija kroz korijen biljke smanjuje nekoliko godina nakon kontaminacije [1,2]. Već je ranije utvrđeno da kestenov med može poslužiti kao bioindikator za praćenje kontaminacije ^{137}Cs niz godina nakon akcidenta u Černobilu [10].

Na području sjeverozapadne Hrvatske sakupljani su uzorci kestenovog meda od 2004. do 2008. godine i u njima je određena koncentracija aktivnosti ^{137}Cs i ^{40}K. Za usporedbu ponašanja cezija poslužio nam je prirodni ^{40}K koji je njegov kemijski homolog [7].

Svrha ovih istraživanja je ustanoviti je li kestenov med pogodan za praćenje onečišćenja okoliša ^{137}Cs dva desetljeća nakon kontaminacije.

MATERIJALI I METODE

Uzorci kestenovog meda sakupljani su na području sjeverozapadne Hrvatske od 2004. do 2008. godine mehanički tijekom vrcanja meda iz košnica. Med je identificiran kao unifloran med od kestena (*Castanea sativa* Mill.) na temelju provedene peludne analize (> 85 % peludnih zrnaca kestena) i izmjerene električne provodnosti meda (> 0,8 mS cm^{-1}). Peludna je analiza provedena prema metodi [11], pri čemu se identifikacija i brojanje peludnih zrnaca u sedimentu iz meda vrši mikroskopiranjem svjetlosnim mikroskopom pri povećanju od 400 puta. Identificiranje se vršilo uz pomoć referentnih uzoraka peludi u obliku nativnih preparata i literature, pri čemu je prebrojano najmanje 500 peludnih zrnaca u sedimentu uzorka [11,12]. Električna je provodnost meda mjerena instrumentom HI 8733 (Hanna Instruments).

Za mjerenje koncentracija aktivnosti ^{40}K i ^{137}Cs korišten je HPGe detektor (Canberra) povezan s 8192-kanalnim analizatorom. Vrijeme brojanja uzoraka je bilo 80 000 sekundi, a dobiveni spektri analizirani su softverom Genie 2000. Detektorski je sustav kalibriran odgovarajućim standardima, a preciznost je provjeravana redovitim interkomparacijskim mjerenjima. Za određivanje koncentracije aktivnosti ^{40}K korišten je fotovrh na 1460,75 keV, a za ^{137}Cs fotovrh na 661,62 keV. Svaka izmjerena koncentracija aktivnosti ^{137}Cs preračunata je na 1. srpnja godine u kojoj je uzorak sakupljen te na 1. srpnja 2006. godine u cilju međusobne usporedbe rezultata bez utjecaja radioaktivnog raspada.

REZULTATI

Rezultati mjerenja koncentracija aktivnosti ^{40}K i ^{137}Cs (Bq kg^{-1}) prikazani su u Tablici 1 iz koje je vidljivo da se aktivnost ^{137}Cs u kestenovom medu vrlo sporo smanjuje tijekom godina. To nije u skladu sa zaključcima nekih autora [13] koji su utvrdili da koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u kestenovom medu opada na polovinu u roku od 577 dana. Ukoliko se eliminira utjecaj radioaktivnog raspada ^{137}Cs, njegove su prosječne aktivnosti u kestenovom medu 2004. godine bile (2,89 ± 1,45) Bq kg^{-1} odnosno (2,29 ± 0,80) Bq kg^{-1} u 2008. godini. To je u skladu sa zaključcima autora [1,2] koji su već prije više od petnaest godina ukazali na činjenicu da je transfer ^{137}Cs iz tala u med vremenski promjenjiv faktor koji kod drvenastih biljaka i grmlja opada najsporije.

Tablica 1. Rezultati mjerenja koncentracija aktivnosti ^{40}K i ^{137}Cs (Bq kg^{-1}) u kestenovim medovima sakupljanim u razdoblju od 2004. do 2008. godine

Godina	**Broj uzoraka**	***A*** **(^{40}K)** Bq kg^{-1}	***A*** **(^{137}Cs)** Bq kg^{-1}	***A*** **(^{137}Cs)*** Bq kg^{-1}
2004.	12	103,6 ± 23,8** 63,6 – 136,8***	3,03 ± 1,52 1,5 – 6,6	2,89 ± 1,45
2005.	14	108,5 ± 26,0 83,9 – 157,2	2,67 ± 0,65 1,5 – 3,8	2,61 ± 0,63
2006.	22	112,6 ± 15,3 86,2 – 139,8	2,66 ± 0,81 1,1 – 4,6	2,66 ± 0,81
2007.	10	115,6 ± 24,8 93,7 – 179,0	2,29 ± 0,56 1,4 – 3,4	2,34 ± 0,57
2008.	12	108,8 ± 27,0 75,5 – 155,9	2,18 ± 0,76 0,9 – 3,2	2,29 ± 0,80

* aktivnost ^{137}Cs preračunata na 01.07.2006.
** srednja vrijednost
*** raspon mjerenih aktivnosti

Istovremeno, koncentracije aktivnosti ^{40}K u kestenovom medu su tijekom cijelog promatranog razdoblja vrlo slične. Rasponi mjerenih koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u cijelom promatranom periodu su relativno uski što samo potvrđuje činjenicu da kestenov med može poslužiti kao dobar pokazatelj prosječnog stanja kontaminacije nekog područja čitav niz godina nakon kontaminacije.

(a) (b)

Slika 1. Koncentracija aktivnosti ^{40}K (a) i ^{137}Cs (b) u kestenovim medovima u razdoblju od 2004. do 2008. godine

ZAKLJUČAK

Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u kestenovom medu se vrlo polagano smanjuju tijekom vremena za razliku od koncentracija aktivnosti ^{40}K koje su ujednačene. Kestenov med može poslužiti kao dobar bioindikator za praćenje kontaminacije ^{137}Cs i dva desetljeća nakon akcidenta u Černobilu.

ZAHVALA

Rad je financiran sredstvima MZOŠ projekata 098-0982934-1713 (Radionuklidi i elementi u tragovima u okolišnim sustavima) te 178-0000000-3580 (Palinološke odlike nektara i meda od ljekovite kadulje (*Salvia officinalis*)).

LITERATURA

[1] Barišić D, Lazarić K, Lulić S, Vertačnik A, Dražić M, Kezić M. ^{40}K, ^{134}Cs and ^{137}Cs in pollen, honey and soil surface layer in Croatia. Apidologie 1994; 25:585-595.

[2] Barišić D, Lulić S, Vertačnik A, Dražić M, Kezić N. Long term behaviour of ^{137}Cs and ^{40}K in honey in Croatia. Proc. Int. Symp. of Apimondia on "BEE BREEDING ON THE ISLANDS" otok Vis, Croatia 1995; str. 56-60.

[3] Barišić D, Bromenshenk J J, Kezić N, Vertačnik A. The role of honey bees in environmental monitoring in Croatia. U: Devillers J, Pham-Delègue M-H, eds. Honey Bees: Estimating the Environmental Impact of Chemicals. Taylor & Francis, London, New York, 2002. 160-185.

[4] Gerzbaek M H, Mohamad S A, Muck K. Cesium-137 in soil texture fractions and its impact on cesium-137 soil-to-plant transfer. Commun. soil sci. plant anal. 1992;23(3&4):321-330.

[5] Livens FR, Horrill AD, Singleton DL. Distribution of radiocesium in the soil-plant system of upland areas of Europe. Health Phys 1992;60(4):539-545.

[6] Molzahn D, Assmann-Werthmuller U. Caesium radioactivty in several selected species of honey. Science of the Total Environment 1993;130/131:95-108.

[7] Zach R, Hawkins J L, Mayoh K R. Transfer of Fallout Cesium-137 and Natural Potassium-40 in a Boreal Environment. J Environ. Radioactivity 1989; 10: 19-45.

[8] Cremers A, Elsen A, De Preter P, Maes A. Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils. Nature 1988;335:247-249.

[9] Sandalls J, Bennett L. Radiocaesium in Upland Herbage in Cumbria, UK: A three year field study. J Environ. Radioactivity 1992;16: 47-165.

[10] Barišić D, Lovrenčić I, Oreščanin V, Kezić N, Bubalo D, Popijač M, Volner M. Med kao bioindikator kontaminacije okoliša cezijem. U: Garaj-Vrhovac V, Kopjar N, Miljanić S, ur. Zbornik radova VI. simpozija Hrvatskoga društva za zaštitu od zračenja; 18.-20. travnja 2005; Zagreb, Hrvatska. Zagreb: HDZZ; 2005. str. 395-399.

[11] Louveaux J, Maurizio A, Vorwohl G. Methods of melissopalynology. Bee World 1978;59:139-157.

[12] Von der Ohe W, Persano Odo L, Piana M L, Morlot M, Martin P. Harmonized methods of melissopalinology. Apidologie 2004;35:18-25.

[13] Panatto D, Gasparini R, Lai P, Rovatti P, Gallelli G. Long-term decline of ^{137}Cs concentration in honey in the second decade after the Chernobyl accident. Science of the total Environment 2007;382 (1):147-152.

^{137}Cs BEHAVIOUR IN CHESTNUT HONEY FROM NORTHWESTERN CROATIA TWO DECADES AFTER CHERNOBYL ACCIDENT

Martina Rožmarić Mačefat[1], Domagoj Barišić[2], Matea Rogić[1], Lidija Svečnjak[2], Marijana Nodilo[1], Dragan Bubalo[2], Marina Popijač[2] and Nikola Kezić[2]

[1]Laboratory for Radioecology, Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
[2]Faculty of Agriculture, University of Zagreb, Zagreb, Croatia
rozmar@irb.hr

Covering the large area in nectar gathering process and searching for food, honey bees yield a unique random composite sample incorporated in honey. Thus, honey represents an excellent media for studying behaviour of bioavailable elements as well as environmental pollutants. Caesium, a product of nuclear weapon testing and Chernobyl nuclear accident, still present in soils, is transferred to plants by plant uptake.

It has already been established that chestnut honey can be used as a bioindicator for monitoring ^{137}Cs many years after the Chernobyl accident. The aim of this study was to determine whether the chestnut honey is suitable for monitoring environmental pollution with ^{137}Cs two decades after the contamination event. Chestnut honey from northwest Croatia has been analysed during the period from 2004 to 2008, for activity concentrations of ^{137}Cs and ^{40}K. Honey samples were collected mechanically by extracting honey from combs. Based on the pollen analysis (> 85 % of chestnut pollen grains) and measured electrical conductivity of honey (> 0.8 mS cm^{-1}), honey has been identified as unifloral chestnut honey (*Castanea sativa* Mill.). ^{137}Cs and ^{40}K activity concentrations have been determined by gamma spectrometry. Decrease of ^{137}Cs activity in chestnut honey was approximated by linear equation. The activity concentration of ^{137}Cs in chestnut honey decreases very slowly over the time as opposed to the activity concentrations of ^{40}K that are more or less equable. Thus, chestnut honey can be used as a good bioindicator for ^{137}Cs even two decades after the Chernobyl accident.

THE RADIOLOGICAL PROTECTION OF WILDLIFE AND ITS IMPLICATIONS

David Copplestone[1] and Rob Allott[2]
[1]University of Stirling, Institute of Biological and Environmental Sciences, School of Natural Sciences, Stirling, Scotland
[2]Environment Agency, Lutra House, Dodd Way, Bamber Bridge, Preston, England
david.copplestone@stir.ac.uk

INTRODUCTION

It is now generally recognised that there needs to be a system to demonstrate that the environment is protected from ionising radiation. In its latest recommendations, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) acknowledged the need for radiological protection of the environment [1] and stated that the Commission "*believes that the development of a clearer framework is required"* for environmental protection. Their framework was subsequently described in ICRP Publication 108 [2]. The International Atomic Energy Agency (IAEA) is revising the international Basic Safety Standards (BSS) to incorporate the IAEAs fundamental safety objective: "*to protect people and the environment from harmful effects of ionizing radiation"* [3]. The European Basic Safety Standards are also being revised and chapter X describes the requirements for environmental protection [4].

There has been considerable international and national effort over the last decade on how to conduct environmental assessments. These have focused on collating relevant information and developing assessment approaches for regulatory purposes [2,5-7]. Validation and comparison of the radioecological and dosimetric components of various approaches has also begun [8]. It is important that the approaches used are practicable, credible to stakeholders and fit for purpose.

One of the main drivers behind the need for radiological protection of the environment has been the need to demonstrate compliance with conservation legislation. In England and Wales, the Environment Agency has a duty to comply with the EU Birds and Habitats Directives (Council Directives 79/409/EEC on the conservation of wild birds and 92/43/EEC on the conservation of natural habitats, and wild flora and fauna) when

planning and undertaking all of its regulatory and operational activities. The Environment Agency must review environmental permits that it has granted – including those for releases of chemicals and radioactive substances – to ensure that these will not result in an adverse effect, either directly or indirectly, on the integrity of identified European Sites. This paper will describe the results of the habitats assessments conducted for 429 Natura sites of conservation value in England and Wales and highlight some of the assumptions, limitations and issues identified.

MATERIAL AND METHODS

The assessment involves the calculation of dose rates to reference organisms and feature species from exposure to permitted discharges of radioactive substances at Natura 2000 sites in England and Wales. The calculated dose rates can then be related to biological effects data (e.g. mortality, morbidity, reproductive effects) to determine the likely risk of impact at the Natura 2000 site. Reference organisms are defined as "*a series of entities that provide a basis for the estimation of radiation dose rate to a range of organisms which are typical, or representative, of a contaminated environment*" [9]. A feature species is a named species that has been identified as requiring protection under one or both of the EU Birds or Habitats Directives. Figure 1 outlines the key steps in the radiological assessment process of a Natura 2000 site.

One key feature of the assessment process is the derivation of some form of numeric criteria to determine the likely risk of radiological impact at a given site. The Environment Agency, Natural England and the Countryside Council for Wales have agreed a dose rate threshold of 40 μGy h^{-1}, below which it has been concluded that there will be no adverse effect on the integrity of a Natura 2000 site. Full details of the assessment approach and the derivation of this numeric value is given in [10].

A number of assumptions were included in the assessment process:

1) Discharges were assumed to be at the Radioactive Substances Act 1993 authorization limits (now Environmental Permit Limits) but in reality actual discharges are likely to be significantly lower than the discharge limit.

2) The calculated dose rate per unit concentration data used to calculate the dose rate to the reference or feature species are based on the work done in [6]. This work incorporated a number of cautious assumptions because there were data and knowledge gaps at that time. Since [6] there

have been a number of projects which have considered a more extensive list of radionuclides and improved our knowledge and understanding.

3) The dispersion modelling conducted was for current discharges and the assessments do not include concentrations of radionuclides which may have been discharged when historical limits were significantly higher. This is more of an issue for radionuclides with longer physical half lives and which may concentrate in the local environment. The Sellafield site in northwest England is an example of a site which had significantly higher historical discharges than current levels.

4) The total dose rate from releases to air and water to the worst affected organism has been calculated from the terrestrial dose rate and water environment dose rate for the worst affected organism. This is a cautious assumption, as the worst affected organism may not be the same for the terrestrial and aquatic environments.

RESULTS

Of the 429 Natura 2000 sites in England and Wales, there are no Radioactive Substances Act 1993 authorisations (now Environmental Permits) affecting 148 sites. For the remaining Natura 2000 sites, the total dose rates ranged from 7.7×10^{-8} to 520 μGy h^{-1} (see Figure 2). There were two Natura 2000 sites with dose rates greater than the agreed threshold of 40 μGy h^{-1}. These sites were the Ribble and Alt Estuaries Special Protected Area (SPA) at 520 μGy h^{-1} and Drigg coast Special Area of Conservation (SAC) at 41 μGy h^{-1}. However the majority of sites had total dose rates < 20 μGy h^{-1} even with the various conservative assumptions that were made within the assessment.

The highest dose rates for reference organisms in the marine assessment at the Ribble and Alt Estuaries SPA were for seabird (500 μGy h^{-1}), seal and whale (520 μGy h^{-1}). For freshwater reference organisms the highest dose rates were amphibian (260 μGy h^{-1}) and duck (130 μGy h^{-1}). For the terrestrial assessment the highest dose rate was for fungi at 3.6 μGy h^{-1}. The radionuclides which provide the greatest contribution to the dose rates to the seabird and seal/whale in the marine assessment are ^{234}Th and other alpha-emitting radionuclides. These radionuclides are also dominant in the freshwater assessment. The source of the discharges of these radionuclides is the Springfields Fuels Ltd site. As the total dose rate for the Ribble and Alt Estuaries SPA was significantly in excess of the agreed 40 μGy h^{-1} threshold, this site was taken forward for

further assessment. However, new, lower permit limits for Springfields Fuels Ltd came into effect from January 2008. These lower limits came about for operational reasons on site and were agreed before the results of this habitats assessment were available. When the dose rates to reference organisms and feature species were recalculated using these new limits, monitoring data and the most recent assessment tool [5], the new dose rates were all less than the 40 $\mu Gy\ h^{-1}$ [11].

The total dose rate for the Drigg coast SAC is just above the agreed threshold of 40 $\mu Gy\ h^{-1}$. The coastal assessment is generally cautious and other more detailed assessments had been conducted on the site for other purposes [12]. When all these factors were considered, it was agreed that, subject to continued monitoring and periodic re-assessment, that there was no indication of significant impact from ionising radiation on the sand dune biota.

CONCLUSION

Dose rates to wildlife arising from discharges to the environment from permits granted by the Environment Agency under the Radioactive Substances Act, 1993 (now Environmental Permits) have been assessed for Natura 2000 sites in England and Wales. These assessments considered the potential impact of all sources of discharge to a Natura 2000 site and have cautiously assumed that discharges occur at the permit limits. The overall assessment also has a number of inherent assumptions which, where possible, have been made to be conservative.

The total dose rates to the worst affected organism are less than the agreed threshold of 40 $\mu Gy\ h^{-1}$ for all but two Natura 2000 sites. This threshold represents the level below which it is accepted that there will be no adverse affect on the integrity of a Natura 2000 site. The assessment process followed a staged approach to identify those sites most at risk from the discharges of radioactive substances and effort to completely assess the risk was targeted at those sites (i.e. the Drigg coastal SAC and the Ribble and Alt Estuaries SPA). This is considered to be an approach consistent with the likely level of risk of impact from ionising radiation to wildlife.

Acknowledgment

This study was supported by Environment Agency in England and Wales. The authors wish to thank Peter Merrill, Steve Oliver and Clive Williams for their input into the work.

Figure 1. Flow chart of the Natura 2000 assessment process

Figure 2. Summary of total dose rate ranges for Natura 2000 sites

REFERENCES

[1] International Commission on Radiation Protection (ICRP). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection Annals of the ICRP, 103, 2007.

[2] ICRP. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. Annals of the ICRP, 108, 2009.

[3] International Atomic Energy Agency (IAEA), Fundamental Safety Principles: Safety Fundamentals. IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna, 2006.

[4] http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/art31/2010_02_24_draft_euratom_basic_safety_standards_directive.pdf

[5] Brown J, Alfonso B, Avila R, Beresford NA, Copplestone D, Proehl G, Ulanovsky A. The ERICA tool. J Environ Radioact 2008;99(9):1371-1383.

[6] Copplestone D, Wood MD, Bielby S, Jones SR, Vives J, Beresford NA. Habitats Regulations for Stage 3 Assessments: Radioactive Substances Authorisations. Environment Agency R&D Technical Report P3-101/SP1a. 2003.

[7] United States Department of Energy, A Graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. Technical standard DOE-STD-1153-2002, USDOE, Washington, 2002.

[8] Beresford NA, Balanov M, Beaugelin-Seiller K, Brown J, Copplestone D, Hingston JL, Horyna J, Hosseini A, Howard BJ, Kamboj S, Nedveckaite T, Olyslaegers G, Sazykina T, Vives i Batlle J, Yankovich T, Yu C. An international comparison of models and approaches for the estimation of radiological exposure to non-human biota. Appl Radiat Isotop 2008;66(11):1745-1749.

[9] Larsson CM, Brewitz E, Jones C. Deliverable 2: Part 1 Formulating the FASSET Assessment Context. FASSET Project Contract No FIGE-CT-20000-00102, 2002.

[10] Allott R, Copplestone D, Merrill P, Oliver S. Habitats Assessments for Radioactive Substances. Environment Agency Report SC060083/SR1, 2009.

[11] Allott R, Copplestone D. Impact of Radioactive Substances on Ribble and Alt Estuarine Habitats. Environment Agency Report SC060083/SR2, 2009.

[12] Wood MD, Beresford NA, Barnett CL, Copplestone D, Leah RT. Assessing radiation impact at a protected coastal sand dune site: An intercomparison of models for estimating the radiological exposure of non-human biota. J Environ Radioact 2009;100(12):1034-1052.

MJERENJE TRICIJA U UZORCIMA VODA TEKUĆINSKIM SCINTILACIJSKIM BROJAČEM UZ ELEKTROLITIČKO OBOGAĆENJE

Jadranka Barešić[1], Ines Krajcar Bronić[1], Nada Horvatinčić[1], Bogomil Obelić[1], Andreja Sironić[1] i Jasmina Kožar-Logar[2]
[1]Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska
[2]Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija
jbaresic@irb.hr, krajcar@irb.hr

UVOD

Termonuklearni pokusi 1950-ih i 1960-ih godina poremetili su prirodnu koncentraciju aktivnosti ^{3}H (nadalje: ^{3}H aktivnost) te je ^{3}H poslužio kao obilježivač prirodnih voda (oborine, površinske i podzemne vode) u ekološkim, hidrološkim i meteorološkim istraživanjima. Mjerenja ^{3}H aktivnosti u površinskim i podzemnim vodama, te oborinama započeta su 1978. u Laboratoriju za mjerenje niskih aktivnosti Instituta Ruđer Bošković (IRB) korištenjem plinskog proporcionalnog brojača (GPC) [1,2,3]. Granica detekcije tom tehnikom mjerenja iznosila je 2 – 3 TU (1 TU = 0,118 Bq/L), pa je metoda bila dovoljno precizna sve dok se aktivnost antropogenog ^{3}H u prirodnim vodama nije smanjila do prirodnih vrijednosti od 5 – 10 TU. Kako bi se ^{3}H i dalje uspješno mogao primjenjivati u navedenim istraživanjima, koristi se metoda elektrolitičkog obogaćenja vode tricijem koja je na IRB uvedena 2008. godine. Za mjerenje aktivnosti ^{3}H obogaćenih uzoraka koristi se tekućinski scintilacijski brojač (LSC) *Quantulus 1220* [4].

Prve usporedbe ^{3}H aktivnosti u prirodnim vodama izmjerenih GPC i LSC metodama na IRB prikazane su u radu [5]. U ovom je radu prikazana usporedba rezultata mjerenja ^{3}H aktivnosti na IRB i u Laboratoriju za tekućinsku scintilacijsku spektrometriju na Institutu Jožef Stefan (IJS) u Ljubljani. Uzorci su u oba laboratorija pripremljeni na aparaturama za elektrolizu istog proizvođača (AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland) i izmjereni u LSC uređajima istog tipa (*Quantulus 1220*, PerkinElmer). Do sada je na IRB napravljeno 19, a na IJS 100 elektroliza od 2007., od kojih je 66 provedeno pod jednakim uvjetima. Analiza parametara sustava za elektrolitičko obogaćenje na IJS objavljena je u [6]. Ovdje ćemo prikazati i naša sudjelovanja u međunarodnoj interkomparaciji TRIC2008 u organizaciji Međunarodne agencije za atomsku energiju IAEA [7].

ELEKTROLITIČKO OBOGAĆENJE

Uređaji za elektrolitičko obogaćenje vode tricijem na IRB i IJS (Slika 1) sastoje se od 20 ćelija volumena 500 mL (katoda od nehrđajućeg čelika i anoda od mekog čelika) smještenih u hladnjaku radi hlađenja ćelija tijekom elektrolize. Uzorke vode potrebno je destilirati prije (primarna destilacija) i nakon elektrolize (sekundarna destilacija). Nakon primarne destilacije vodljivost treba biti ispod 50 μS cm^{-1} (IRB), odnosno ispod 25 μS cm^{-1}, uz uvjet 5 < pH < 8, na IJS.

a) b)

Slika 1. a) Uređaj za primarnu destilaciju uzoraka voda (lijevo) i uređaj za elektrolitičko obogaćenje (desno); b) ćelija za elektrolizu vode

U svakom procesu obogaćenja elektrolizira se 15 uzoraka nepoznate aktivnosti, 3 uzorka poznate aktivnosti ^3H (tzv. "spike") i dva uzorka koji ne sadrže ^3H (tzv. "background") radi kontrole sustava. Za jedan postupak elektrolize troši se 1420 Ah (IRB), odnosno 1400 Ah (IJS) tijekom 8 dana, a početni volumen uzorka od 500 mL se pritom smanji do (18 ± 1) mL na IRB, odnosno do (19 ± 2) mL na IJS. Na temelju početne i konačne mase uzorka, te odbroja (cpm – *count rate/minute*) "spike" uzorka prije i poslije elektrolize, određuju se faktor obogaćenja *E* i parametar obogaćenja *P* koji ujedno definiraju i uspješnost elektrolize.

$$E_{uzorak} = \exp\left(\frac{Q}{2{,}975}\right) \times P \times \frac{\ln\left(W_{i,uzorak}/W_{f,uzorak}\right)}{W_{i,uzorak} - W_{f,uzorak}} \qquad (1)$$

$$P = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3}\left(\left(W_{i,spike} - W_{f,spike}\right)_j \times \ln E_{spike} \Big/ \ln\left(W_{i,spike}/W_{f,spike}\right)_j \times \frac{Q}{2{,}975}\right) \qquad (2)$$

$$E_{spike} = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{3}\left(\frac{cpm_{spike,j}}{cpm_{spike\ BE}}\right) \qquad (3)$$

gdje je $W_{i,uzorak}$ masa uzorka prije, a $W_{f,uzorak}$ masa uzorka poslije elektrolize, Q je broj Ah za pojedinu elektrolizu, $cpm_{spike,j}$ je neto odbroj obogaćenog, a $cpm_{spike,BE}$ je neto odbroj neobogaćenog "spike" uzorka.

Slika 2 prikazuje vrijednosti parametra obogaćenja P za IRB sustav. Vrijednost P trebala bi biti što bliže jedinici [8] za stabilan i efikasan sustav. Vrijednosti P za prvih 6 elektroliza brzo rastu, a kasnije se stabiliziraju oko vrijednosti 0,95 (0,949 ± 0,003, N = 14, raspon od 0,934 do 0,968), što znači da se sustav za elektrolizu stabilizirao. Srednja vrijednost parametra P na IJS, za 66 elektroliza provedenih pod identičnim uvjetima, iznosi (0,896 ± 0,021), s rasponom od 0,857 do 0,996. Srednji faktor obogaćenja E na IRB (Slika 3) izračunat je na temelju vrijednosti E dobivenih za elektrolize od broja 6 do 19, tj. nakon stabiliziranja sustava za elektrolizu, i iznosi (22,5 ± 0,5), s rasponom od 20,4 do 27,2. Faktor obogaćenja E na IJS kreće se od 15,68 do 24,42 sa srednjom vrijednošću (18,9 ± 1,5).

Slika 2. Parametar obogaćenja P na IRB

Slika 3. Faktor obogaćenja E na IRB

MJERENJE U TEKUĆINSKOM SCINTILACIJSKOM BROJAČU

Za mjerenje ^{3}H aktivnosti u vodama u LSC-u potrebno je u plastičnim kivetama od 25 mL pomiješati 8 mL uzorka s 12 mL scintilacijskog sredstva UltimaGold LLT (IRB), dok se na IJS koriste Ultima Gold LLT, Ultima Gold uLLT ili HiSafe 3. Za svaki scintilator i svaki od dva brojača na IJS su napravljene specifične kalibracijske krivulje i krivulje gašenja. Osim 20 elektrolitički obogaćenih uzoraka, na IRB se mjere i 4 uzorka koji nisu prošli elektrolizu (2 "backgrounda", "spike" i referentni standard). Na IJS mjeri se 20 elektroliziranih uzoraka posebno, a set standardnih uzoraka

(referentni standard, "spike", "background") posebno. Uzorci se mjere u 6 - 10 ciklusa po 50 min (IRB), odnosno u 3 do 5 ciklusa po 100 minuta (IJS). Optimizacijom mjernih uvjeta određen je mjerni prozor između kanala 25 i 187 višekanalnog analizatora u *Quantulusu* na IRB. On obuhvaća 92 % spektra tricija i 82 % spektra "backgrounda" [4]. Mjerni prozor na IJS obuhvaća kanale od 5 do 200. Granica detekcije ove tehnike iznosi 0,3 – 0,5 TU.

USPOREDBA REZULTATA IJS – IRB

Usporedba rezultata dobivenih mjerenjem ^{3}H aktivnosti u različitim uzorcima u laboratorijima IJS i IRB prikazana je na Slici 4. Uspoređene su ^{3}H aktivnosti referentnih standarda i "spike" uzoraka u oba laboratorija (bez elektrolitičkog obogaćenja), te uzorci prirodnih voda (kišnice, površinske i podzemne vode), koji su u oba laboratorija prošli standardne procedure pripreme i mjerenja. Opaženo je dobro slaganje oba niza mjerenja s koeficijentom korelacije 0,991.

Slika 4. Usporedba ^{3}H aktivnosti izmjerenih na IRB i IJS u različitim prirodnim vodama i aktivnim standardima

INTERKOMPARACIJA IAEA TRIC2008

U sklopu interkomparacije IAEA TRIC2008 izmjerena je ^{3}H aktivnost u šest uzoraka vode (Tablica 1) u oba laboratorija, te su za svaki uzorak izračunate vrijednosti parametara z i u. Vrijednost parametra z predstavlja odstupanje izmjerene od referentne IAEA vrijednosti:

$$z = \frac{A_{lab} - A_{IAEA}}{\sigma_{lab}} \qquad (4)$$

gdje su A_{lab} i σ_{lab} aktivnost uzorka i mjerna pogreška izmjerene u laboratoriju (IRB ili IJS), a A_{IAEA} je referentna ^{3}H aktivnost uzorka. Vrijednost parametra u određuje prihvatljivost rezultata mjerenja:

$$u = \frac{|A_{lab} - A_{IAEA}|}{\sqrt{\sigma_{lab}^2 + \sigma_{IAEA}^2}} \qquad (5)$$

U interkomparaciji TRIC2008, određeno je da je rezultat prihvatljiv, tj. da nema značajnog odstupanja izmjerene ^{3}H aktivnosti od IAEA referentne vrijednosti, ako je $u < 1{,}64$ [7]. Budući da su vrijednosti σ_{IAEA} puno manje od mjernih pogrešaka σ_{IRB} i σ_{IJS}, to su vrijednosti parametra u za svaki uzorak jednake apsolutnim vrijednostima z.

Rezultati (Tablica 1) pokazuju da su odstupanja izmjerene ^{3}H aktivnosti od referentnih IAEA vrijednosti vrlo mala, te da je u svakom laboratoriju za 5 uzoraka odstupanje unutar 1σ ($-1 < z < 1$), a samo za jedan uzorak je odstupanje veće od 1σ. Srednja z vrijednost za IRB rezultate iznosi -0,28, što znači da su u prosjeku IRB rezultati niži od očekivane vrijednosti za 0,28 procijenjene pogreške mjerenja. Svi IJS uzorci imaju $z \geq 0$ (izmjerene ^{3}H aktivnosti su više od referentnih) sa srednjom vrijednošću 0,58. Sve u vrijednosti su niže od granične vrijednosti od 1,64 (srednja vrijednost parametra u iznosi 0,51 (IRB) i 0,58 (IJS)), što znači da su svi rezultati mjerenja u oba laboratorija prihvatljivi i ne odstupaju od referentne vrijednosti.

Tablica 1. Usporedba ^{3}H aktivnosti uzoraka iz IAEA TRIC2008 interkomparacije izmjerenih na IRB i IJS i izračunate z vrijednosti

IAEA		**IJS**			**IRB**		
oznaka	$A_{IAEA} \pm \sigma_{IAEA}$ **(TU)**	**Lab. oznaka**	$A_{IJS} \pm \sigma_{IJS}$ **(TU)**	z_{IJS}	**Lab. oznaka**	$A_{IRB} \pm \sigma_{IRB}$ **(TU)**	z_{IRB}
T14	1,54 ± 0,05	TRIC08-T14-C1	1,68 ± 0,17	0,79	T-3906	1,25 ± 0,3	-0,97
T15	4,07 ± 0,05	TRIC08-T15-C1	4,20 ± 0,34	0,38	T-3907	4,11 ± 0,3	0,13
T16	7,74 ± 0,06	TRIC08-T16-C1	8,46 ± 1,03	0,70	T-3908	7,42 ± 0,3	-1,06
T17	14,46 ± 0,08	TRIC08-T17-C1	14,46 ± 0,95	0,00	T-3909	14,44 ± 0,4	-0,05
T18	0,67 ± 0,05	TRIC08-T18-C1	0,89 ± 0,18	1,18	T-3910	0,57 ± 0,3	-0,33
T19	568,7 ± 2,3	TRIC08-T19-C1	581 ± 26	0,47	T-3911	576 ± 13	0,56

ZAKLJUČAK

Elektrolitičko obogaćenje vode tricijem i mjerenje ^{3}H aktivnosti u vodama u tekućinskom scintilacijskom brojaču *Quantulus* omogućuje detekciju vrlo niskih ^{3}H aktivnosti (granica detekcije 0,3 – 0,5 TU) i daljnju primjenu izotopa tricija u hidrogeologiji, ekologiji i meteorologiji. Usporedba rezultata mjerenja između dvaju laboratorija, IRB i IJS, koji rade na identičnim elektrolitičkim aparaturama i mjere uzorke u identičnim uređajima, pokazala je dobro slaganje izmjerenih ^{3}H aktivnosti. Rezultati IAEA interkomparacije TRIC2008 pokazali su da su odstupanja izmjerenih od referentnih ^{3}H aktivnosti u oba laboratorija unutar 1σ mjerne pogreške.

ZAHVALA

Rad je izrađen uz financijsku potporu projekta MZOS 098-0982709-2741, te bilateralnog hrvatsko-slovenskog projekta "Mjerenje koncentracije aktivnosti tricija u prirodnim vodama uz elektrolitičko obogaćenje". Autori zahvaljuju Katarini Kovačič (IJS), Romani Krištof (Ames d.o.o., Ljubljana) i Maruši Jerina na pomoću u elektrolitičkom obogaćenju uzoraka.

LITERATURA

[1] Horvatinčić N Radiocarbon and tritium measurements in water samples and application of isotopic analysis in hydrology. Fizika 1980; 12 (S2): 201-218.

[2] Krajcar Bronić I; Obelić B, Srdoč D. The simultaneous measurement of tritium activity and background count rate in a proportional coounter by the Povinec method. Nucl Instrum Methods B 1986; B17: 498-500.

[3] Krajcar Bronić I, Vreča P, Horvatinčić N, Barešić J, Obelić B. Distribution of hydrogen, oxygen and carbon isotopes in the atmosphere of Croatia and Slovenia. Arh Hig Rada Toksikol 2006; 57(1): 23-29.

[4] Obelić B, Krajcar Bronić I, Horvatinčić N, Barešić J. Comparison of different methods of environmental radioactivity measurements at Zagreb Radiocarbon and Tritium Laboratory. 11th International Congress of IRPA, Madrid, Spain, IRPA11 Full Papers, paper no. 6c21, 7 pages, Madrid, 2004.

[5] Barešić J, Horvatinčić N, Krajcar Bronić I, Obelić B. Comparison of two techniques for low-level tritium measurement – gas proportional and liquid scintillation counting. Third European IRPA Congress, Proceedings, Full papers. Helsinki, Finska: IRPA, 2010. P12-21-1 – P12-21-5.

[6] Kožar Logar J, Glavič-Cindro D. Establishment of low level tritium laboratory. LSC 2008, Advances in Liquid Scintillation Spectrometry. University of Arizona, Tuscon, Arizona, 2009, p. 241-249.

[7] Gröning M, Tatzber H, Trinkl A, Klaus P, van Duren M. Eighth IAEA Interlaboratory Comparison on the determination of low-level tritium activities in water (TRIC2008). Report, IAEA, Vienna, 2009.

[8] Rozanski K, Groening M. Tritium assay in water samples using electrolytic enrichment and liquid scintillation spectrometry. In: Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements, IAEA-TECDOC-1401;2004. p.195-217.

TRITIUM ACTIVITY MEASUREMENT OF WATER SAMPLES USING LIQUID SCINTILLATION COUNTER AND ELECTROLYTICAL ENRICHMENT

Jadranka Barešić[1], Ines Krajcar Bronić[1], Nada Horvatinčić[1], Bogomil Obelić[1], Andreja Sironić[1] and Jasmina Kožar-Logar[2]
[1]Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia
[2]Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia
jbaresic@irb.hr, krajcar@irb.hr

Tritium (^{3}H) activity of natural waters (precipitation, groundwater, surface waters) has recently become too low to be directly measured by low-level liquid scintillation (LSC) techniques. It is therefore necessary to perform electrolytical enrichment of tritium in such waters prior to LSC measurements. Electrolytical enrichment procedure has been implemented at the Ruđer Bošković Institute (RBI) Tritium Laboratory in 2008, and since then 19 electrolyses have been completed. The mean enrichment factor E (a ratio between the final and initial ^{3}H activities) after stabilisation of the system is E_{RBI} = 22.5 ± 0.5, and the mean enrichment parameter (which describes the process of water mass reduction during electrolysis) is P_{RBI} = 0.949 ± 0.003. These values are comparable with those obtained at the Jožef Stefan Institute (JSI) Laboratory for liquid scintillation counting, at the electrolysis equipment of the same producer (AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland) after 66 electrolyses carried out under identical conditions since 2007: E_{JSI} = 18.9 ± 1.5, and P_{JSI} = 0.896 ± 0.021.

Both RBI and JSI laboratories have Ultra-low-level LSC *Quantulus 1220* (Wallac, PerkinElmer) for measurement of ^{3}H activity. A set of water samples having ^{3}H activities in the range from 0 TU ("dead-water" samples) to 18 000 TU (1 TU = 0.118 Bq/L) were measured at both laboratories. Samples having ^{3}H activity <200 TU were electrolytically enriched, while the others were measured directly in LSC. A very good agreement was obtained (correlation coefficient 0.991).

Both laboratories participated in the IAEA TRIC2008 international intercomparison exercise. The analyses of reported ^{3}H activity results in terms of z and u parameters showed that all results in both laboratories were acceptable.

ANALIZA STABILNOSTI RADA HPGe SPEKTROMETRA U OKVIRU INTERNE KONTROLE KVALITETA

Aleksandar Kandić, Bojan Šešlak, Ivana Vukanac, Mirjana Đurašević i Zoran Milošević
Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija
akandic@vinca.rs

UVOD

Osiguranje kvaliteta u kontekstu analitičkih istraživanja zahteva kontrolu koja obezbeđuje poverenje u tačnost rezultata analize. Da bi se postigao veći stepen transparentnosti procedura, minimizirali potencijalni izvori grešaka, standardizovalo rukovanje uzorcima, instrumentima i podacima, a samim tim smanjila stopa neusaglašenosti rezultata, razvijeni su koncepti kontrole i osiguranja kvaliteta.

Međunarodno usaglašena procedura za akreditaciju analitičke laboratorije od strane nacionalnog akreditacionog tela predstavlja pravi način da se analitički rad laboratorije prihvati i pravno prizna u međunarodnim okvirima, pri čemu ne treba potceniti ni ekonomski značaj.

Laboratorija za nuklearnu i plazma fiziku Instituta za nuklearne nauke "Vinča" akreditovana je za gamaspektrometrijsku analizu sadržaja radionuklida u uzorcima iz životne sredine po standardu SRPS ISO/IEC 17025:2006 [1]. Prema zahtevima standarda, a u skladu sa preporukama datim u TCS No. 24 [2], obavlja se stalna interna kontrola kvaliteta rada poluprovodničkog HPGe spektrometra. Interna kontrola obuhvata periodičnu proveru karakteristika ovog uređaja. U radu su prikazane kontrolne karte ispitivanih karakteristika od juna do decembra 2010, na osnovu kojih je analizirana dugovremenska stabilnost rada spektrometra.

OSIGURANJE I KONTROLA KVALITETA (QA/QC)

U novije vreme kredibilitet jedne laboratorije za ispitivanje sve više zavisi od dokumentovanih dokaza implementacije osiguranja i kontrole kvaliteta u skladu sa međunarodnim standardima. Na osnovu toga

neophodno je postaviti kompletan sistem kvaliteta u određenoj oblasti rada laboratorije. Pri tome treba voditi računa da je osiguranje i kontrola kvaliteta trajan proces, a ne cilj koji se ostvaruje jednom i zauvek.

Rezultate određenog procesa merenja potrebno je pratiti tokom dužeg vremenskog perioda, a podaci se predstavljaju tabelarno i grafički. Grafički prikaz se daje na kontrolnim kartama na kojima se definišu granice upozorenja (sistem bi mogao biti izvan kontrole) i granice akcije (sistem je van kontrole i neophodno je preduzeti korektivne mere).

Na osnovu većeg broja merenja formira se skup izmerenih vrednosti (populacija) i određuje srednja vrednost populacije. Pojedinačna merenja će uglavnom biti simetrično raspoređena oko te srednje vrednosti, odnosno imaće Gausovu raspodelu. Verovatnoća da će izmerena vrednost biti unutar ±2 standardne devijacije u odnosu na srednju vrednost iznosi 95 %, dok je verovatnoća će biti unutar ±3 standardne devijacije iznosi 99,7 %. Svi rezultati merenja treba da se nalaze u okviru datih granica. Ako to nije slučaj, pretpostavlja se da su verovatno nastale neke promene u mernom sistemu, koji je značajno izmenio svoje performanse, a samim tim da je došlo do promena srednje vrednosti i/ili standardne devijacije. Svrha kontrolne karte je da ovu promenu učini vidljivom. Analitičar na osnovu prikazanih rezultata mora da odluči da li je ova promena veoma značajna ili ne, odnosno da li je neophodno da se preduzmu korektivne mere.

Najjednostavniji tip kontrolne karte je Shewhartova karta. Izmerene vrednosti (aktivnost, FWHM, FWTM) se crtaju na y osi, a vreme uzastopnih merenja na x osi (tj. dnevno, nedeljno, itd.). Shewhartova karta može prikazivati podatke na dnevnoj osnovi, ali ako je merni sistem dovoljno stabilan, obično se uzima da je vremenski interval između dva merenja nedelju dana.

Na Shewhartovoj karti srednja vrednost se često koristi kao ciljna vrednost, odnosno tzv. prava vrednost, dok se standardna devijacija koristi za postavljanje granica. Prihvaćeno je da se granice upozorenja postave na ±2 standardne devijacije, a da se granice akcije postave na ±3 standardne devijacije. Kada se rezultat merenja nalazi izvan granica upozorenja, potrebna je pažljiva analiza, a ako se nalazi izvan granica akcije smatra se da postoji potencijalna greška. Signal koji obično ukazuje na problem sa

sistemom za merenje, tj. da je neophodno da se preduzmu korektivne mere, javlja se u sledećim slučajevima:

- dve uzastopne izmerene vrednosti izvan granica akcije,
- četiri uzastopna izmerene vrednosti izvan granica upozorenja,
- deset uzastopnih izmerenih vrednosti sa iste strane srednje vrednosti,
- uzlazni ili silazni trend za nekoliko uzastopnih izmerenih vrednosti.

INTERNA KONTROLA KVALITETA RADA MERNOG UREĐAJA

Da bi se obezbedilo poverenje u rezultate ispitivanja merenih uzoraka, neophodno je u skladu sa preporukama datim u TCS No. 24. vršiti stalnu internu kontrolu kvaliteta rada poluprovodničkog HPGe spektrometra. Interna kontrola obuhvata periodičnu proveru karakteristika ovog uređaja, pri čemu se izmerene vrednosti unose u odgovarajuće kontrolne karte.

Karakteristike poluprovodničkog HPGe spektrometra koje se periodično proveravaju su:

- širina na polovini visine pika (FWHM), čime se procenjuje kvalitet rezolucije sistema. Povećanje rezolucije može biti uzrokovano povećanim elektronskim šumom spektrometra, ili može ukazivati na problem sa vakuumom u sistemu,
- širina na desetini visine pika (FWTM), zbog eventualnog uočavanja oštećenja kristala detektora, lošeg p/z odnosa i postojanja struje curenja,
- odnos FWHM/FWTM za različite energije gama zračenja čime se prati kvalitet samog spektrometra,
- odbroj ispod pika, čime se proverava stabilnosti mernog sistema,
- odbroj u fonu, čime se utvrđuje moguća kontaminacija detektorskog sistema,
- položaj pika, čime se dodatno proverava stabilnost elektronike u spektrometarskom sistemu i uticaj okoline (vlažnost, temperatura) na merenje.

REZULTATI MERENJA

Interna kontrola kvaliteta rada sprovodi se na gama spektrometrijskom sistemu koji se sastoji od HPGe detektora (GEM30-70 *Ortec*, relativne efikasnosti 37 %, rezolucije 1,66 keV i odnos pik-Kompton je 70:1) sa standardnom pratećom elektronikom.

Tokom maja 2010. izvršene su preliminarne serije od po 10 uzastopnih merenja kontrolnih izvora i fona na dnevnoj osnovi, na osnovu kojih su utvrđene srednje vrednosti i odgovarjuće standardne devijacije. Ovi podaci poslužili su za uspostavljanje kontrolnih karti.

Kao kontolni izvori za proveru FWHM, FWTM, odnosa FWHM/FWTM, i položaja pika korišćeni su tačkasti izvori ^{60}Co i ^{137}Cs. Za proveru odbroja ispod pika korišćen je tačkasti izvor ^{137}Cs, za koji se korekcija na raspad vrši svaka dva meseca sa korekcionim faktorom 0,996218.

U periodu od juna do decembra realizovana su 32 merenja, a rezultati tih merenja prikazani su kontrolnim kartama (Slika 1).

ZAKLJUČAK

Interna kontrola obuhvata periodičnu proveru karakteristika mernog uređaja. U radu je prikazana primena interne kontrole kvaliteta na gama spektrometrijskom sistemu koji se koristi za ispitivanje uzoraka iz životne sredine. Na osnovu prikazanih kontrolnih karti može se zaključiti da je rad spektrometarskog sistema stabilan i da se rezultati dobijeni merenjem mogu smatrati pouzdanim, odnosno da je rad akreditovane laboratorije za ispitivanje usaglašen sa međunarodnim preporukama.

Zahvalnica

Rad je finansiran sredstvima Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta 141019.

REFERENCE

[1] SRPS ISO/IEC 17025:2006, Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje (ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories).

[2] TCS No. 24, Quality System Implementation for Nuclear Analytical Techniques, IAEA, Vienna, 2004.

Slika 1. Kontrolne karte za HPGe spektrometar

ANALYSIS OF HPGe SPECTROMETER STABILITY – INTERNAL QUALITY CONTROL

Aleksandar Kandić, Bojan Šešlak, Ivana Vukanac, Mirjana Đurašević and Zoran Milošević
Institute of Nuclear Sciences "Vinča", University of Belgrade, Serbia
akandic@vinca.rs

Laboratory for Nuclear and Plasma Physics, Institute "Vinča" is authorized and accredited in accordance with ISO/IEC 17025 for measurements of radionuclide content in environmental samples. In accordance with a standards request and international recommendations, TCS No. 24, Quality System Implementation for Nuclear Analytical Techniques**,** permanent internal quality control of semiconductor HPGe spectrometer has been conducted. Periodical testing of spectrometer characteristics and creation of control charts are included in internal quality control processes. The evaluation of the measuring system can be performed by periodical testing as follows:

- FWHM chart provides evaluation of the resolution of a detector. Variation of the FWHM could be caused by electronic noise inside the detector, or might indicate a vacuum problem.
- FWTM chart allows to monitor tailing due to damage of the detection crystal, bad P/Z ration may indicate a leakage current
- The ratio FWHM/FWTM for different gamma ray energies allows to monitor the quality of the detector
- Activity chart allows to monitor the stability of the whole method
- Background chart might discover contamination
- Peak position chart provide indications for electronic stability and the influence of environmental conditions such as temperature or humidity.

Point sources ^{60}Co and ^{137}Cs were used as a control sources for FWHM, FWTM, FWHM/FWTM ratio and peak position testing. Presented control charts, for a period June – December 2010, were used for an analysis of spectrometer stability. These charts show that performances of analyzed HPGe spectrometer were stable, meaning that measurements results for environmental samples could be considered as reliable, i.e. that the practice of Laboratory fully consists with an international recommendations.

ODREĐIVANJE SADRŽAJA RADIONUKLIDA U OKVIRU MEĐUNARODNIH INTERKOMPARATIVNIH MERENJA – IAEA-CU-2008-03 I IAEA-CU-2009-03

Mirjana Đurašević, Ivana Vukanac, Aleksandar Kandić, Bojan Šešlak i Zoran Milošević
Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Srbija
mirad@vinca.rs

UVOD

Učešće u interkomparativnim merenjima, za laboratorije akreditovane po standardu SRPS ISO/IEC 17025:2006 predstavlja vid eksterne kontrole kvaliteta. Na taj način akreditovana laboratorija potvrđuje tačnost, pouzdanost i reproducibilnost akreditovane metode.

Evropski centri kao što su IAEA, JRC, i IRMM u okviru svojih redovnih aktivnosti imaju obavezu organizacije i realizacije programa interkomparativnih merenja. Jedan deo tih programa odnosi se na merenje sadržaja prirodnih i veštačkih radionuklida u uzorcima iz okoline. Laboratorija za nuklearnu i plazma fiziku, Instituta "Vinča", redovno učestvuje na nekom od takvih programa u cilju obezbedjenja kvaliteta rezultata ispitivanja.

U toku 2008. i 2009. godine učestvovali smo na dve interkomparativne kampanje organizovane od strane Grupe za Referentne Materijale (Reference Materials Group) u sklopu IAEA (International Atomic Energy Agency):

- The IAEA-CU-2008-03 Worldwide open proficiency test: Određivanje prirodnih radionuklida u fosfogipsu i vodi.
- The IAEA-CU-2009-03 Worldwide open proficiency test: Određivanje prirodnih i veštačkih radionuklida u zemljištu sa mahovinom i spajkovanoj vodi.

UZORCI MERENI U INTERKOMPARATIVNIM KAMPANJAMA

U okviru kampanje IAEA-CU-2008-3 distribuirani su sledeći uzorci: dva uzorka spajkovane vode (gde je trebalo odrediti ^{234}U, ^{238}U i ^{226}Ra) i uzorak fosfogipsa (gde je trebalo odrediti ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{230}Th, ^{234}U i ^{238}U).

U okviru kampanje IAEA-CU-2009-3 distribuirani su sledeći uzorci: tri uzorka spajkovane vode (gde je trebalo odrediti ^{57}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{134}Cs,

^{137}Cs, ^{54}Mn, ^{133}Ba, i ^{152}Eu), kao i uzorak zemljišta sa mahovinom (gde je trebalo odrediti ^{40}K, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{208}Tl ^{210}Pb, ^{212}Pb, ^{214}Pb, ^{214}Bi, ^{226}Ra, ^{228}Ac, ^{234}Th i ^{241}Am).

Hemijski gips – fosfogips, nastaje kao sporedni proizvod pri proizvodnji fosforne kiseline dihidratnim, tzv. "mokrim postupkom" [1], pri čemu vrlo visok procenat radijuma i olova (99,5 % ^{226}Ra, i 93 % ^{210}Pb) od ukupne početne koncentracije u fosfatnoj rudi ostaje u fosfogipsu. Slično ponašanje pokazuju ^{232}Th i ^{228}Th. Za razliku od njih, ^{238}U i ostali radionuklidi iz uranovog niza najvećim delom ostaju u fosfornoj kiselini [2].

Uzorak fosfogipsa meren u okviru ove interkomparativne kampanje sakupljen je sa deponije u blizini fabrike za proizvodnju fosforne kiseline koja se nalazi u Gdanjsku u Poljskoj.

Uzorak zemljišta sa mahovinom meren u okviru prikazane interkomparativne kampanje sakupljen je od strane Mađarskog zavoda i potiče iz okoline starog rudnika crvenog mermera koji je napušten šezdesetih godina i nalazi se u planini Gerecse u severozapadnom delu Mađarske. U okviru programa zaštite životne sredine, u poslednjih nekoliko godina, razvijene su metode za monitoring u kojima se mahovine koriste kao biološki indikatori raznih zagađivača. Zbog svoje strukture mahovine mogu da akumuliraju i adsorbuju nečistoće preko cele svoje površine. Mahovine nemaju korenski sistem tako da hranjive materije koje koriste adsorbuju direktno iz atmosfere [3].

EKSPERIMENT

Dobijeni uzorci vode, fosfogipsa i zemljišta sa mahovinom pripremljeni su za merenje u skladu sa preporukama organizatora interkomparativnih kampanja [4,5].

Svi uzorci mereni su u standardnim geometrijama na HPGe poluprovodničkom spektrometru GEM30-70 *Ortec*, relativne efikasnosti 37 %, rezolucije 1,66 keV i odnos pik-Kompton je 70:1. Za obradu spektara korišćen je softverski paket Genie 2000 [6].

Kalibracija efikasnosti germanijumskog detektora vršena je snimanjem spektara standardnih referentnih materijala. Korišćeni su standardi vode i mleka u prahu spajkovani standardnim rastvorom miksa radionuklida ^{241}Am, ^{109}Cd, ^{139}Ce, ^{57}Co, ^{60}Co, ^{88}Y i ^{137}Cs [7]. Standardi vode sa ^{152}Eu i ^{133}Ba koji su pripremljeni u laboratoriji od sertifikovanih rastvora takođe su mereni u cilju određivanja efikasnosti na energijama emisije ovih radionuklida.

REZULTATI

Svi rezultati u okviru obe interkomparativne kampanje dati su na nivou poverenja 67 % (1σ), a greška merenja određena je primenom opšteg zakona propagacije greške i uključivala je statističku grešku merenja, grešku određivanja krive efikasnosti i grešku merenja mase.

Rezultati interkomparativnog merenja IAEA-CU-2008-3

U Tabeli 1 prikazane su izmerene specifične aktivnosti za tražene radionuklide kao i referentne vrednosti date od strane IAEA.

Analiza dobijenih rezultata pokazala je dobro slaganje za ^{210}Pb, ^{226}Ra, ^{230}Th i ^{238}U. Za ^{234}U dobijeno je veliko neslaganje. Specifična aktivnost datog izotopa određena je preko linije 53,2 keV, a da pri tome nije uzeto u obzir da i izotop ^{214}Pb, takođe ima liniju na energiji 53,2275 keV (prinos 1,06 %). Zato je trebalo od ukupnog odbroja ispod pika oduzeti odbroj koji pripada ^{214}Pb.

Tabela 1. Rezultati merenja aktivnosti pojedinih radionuklida u uzorku fosfogipsa

Radionuklid	**Izmerene vrednosti** [Bq/kg]	**Referentne vrednosti** [Bq/kg]
^{210}Pb	748 ± 83	680 ± 29
^{226}Ra	921 ± 115	780 ± 31
^{230}Th	250 ± 70	211 ± 4,5
^{234}U	5885 ± 875	120 ± 4,5
^{238}U	161 ± 25	120 ± 5,5

Merenje uzoraka vode pokazalo je da se vrednosti specifičnih aktivnosti za ^{234}U, ^{238}U i ^{226}Ra nalaze daleko ispod minimalne detektabilne aktivnosti traženih radionuklida pri realizovanim uslovima merenja. To potvrđuje da za uzorke niskih aktivnosti (≤ 1 Bq/kg) alfaspektrometrijska metoda ima prednost u odnosu na gamaspektrometriju.

Rezultati interkomparativnog merenja IAEA-CU-2009-3

U okviru ove interkomparativne kampanje mereni su uzorak zemljišta sa mahovinom i tri uzorka vode. U Tabeli 2 prikazane su izmerene vrednosti specifičnih aktivnosti za tražene radionuklide, kao i referentne vrednosti.

Tabela 2. Rezultati merenja aktivnosti pojedinih radionuklida u uzorku zemljišta sa mahovinom

Radionuklid	**Izmerene vrednosti** [Bq/kg]	**Referentne vrednosti** [Bq/kg]
^{40}K	689 ± 35	550 ± 20
^{137}Cs	478 ± 24	425 ± 10
^{241}Am	2,8 ± 0,52	2,2 ± 0,2
^{210}Pb	404 ± 22	424 ± 20
^{212}Pb	44,3 ± 2,5	37,0 ± 1,5
^{214}Pb	29,6 ± 1,6	26,0 ± 2,0
^{214}Bi	25,9 ± 1,4	24,8 ± 2,0
^{226}Ra	25,7 ± 2,1	25,1 ± 2,0
^{234}Th	30,8 ± 3,1	25,5 ± 3,0
^{228}Ac	37,9 ± 2,1	37,0 ± 2,0
^{208}Tl	12,7 ± 0,7	13,0 ± 0,5

U Tabeli 3 prikazane su izmerene i referentne vrednosti specifičnih aktivnosti za tražene radionuklide u uzorcima vode 01, 02 i 03.

Tabela 3. Rezultati merenja aktivnosti pojedinih radionuklida u uzorcima vode

Radio nuklid	**Uzorak 01**		**Uzorak 02**		**Uzorak 03**	
	Izmerene vrednosti [Bq/kg]	Referentne vrednosti [Bq/kg]	Izmerene vrednosti [Bq/kg]	Referentne vrednosti [Bq/kg]	Izmerene vrednosti [Bq/kg]	Referentne vrednosti [Bq/kg]
^{152}Eu	11,0±0,3	11,3±0,23	4,1±0,1	3,7±0,08	10,8±0,3	11,3±0,23
^{134}Cs	12,8±0,7	13,9±0,28	4,6±0,3	4,6±0,1	12,6±0,6	13,9±0,28
^{137}Cs	9,7±0,2	9,5±0,19	3,5±0,1	3,2±0,06	9,8±0,2	9,5±0,19
^{57}Co	7,4±0,3	7,5±0,15	2,7±0,2	2,5±0,05	7,1±0,4	7,5±0,15
^{60}Co	6,3±0,1	6,0±0,12	2,3±0,1	2,1±0,04	6,1±0,1	6,0±0,12

ZAKLJUČAK

Učešće naše laboratorije na interkomparativnim merenjima IAEA–CU-2008-3 i IAEA–CU-2009-3 od izuzetne je važnosti ne samo iz razloga provere tačnosti i preciznosti korišćene analitičke metode već i kod određivanja granica primenljivosti gamaspektrometrijske metode u našim uslovima merenja. Uopšteno gledajući, izmerene vrednosti specifičnih aktivnosti traženih radionuklida prihvatljive su i po tačnosti i po preciznosti, osim u slučaju ^{234}U u uzorku fosfogipsa, ^{40}K u uzorku zemljišta sa mahovinom i ^{152}Eu u uzorku vode 02. Analiza uočenih neslaganja ukazala nam je na učinjene propuste i pomogla u njihovom otklanjanju.

Zahvalnica

Rad je finansiran sredstvima Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta 141019.

REFERENCE

[1] Rajković M, Lačnjevac Č, Tošković D, Stanojević D. Ispitivanje mogućnosti primene fosfogipsa za izradu pregradnog zida – elementa montažnog objekta. Originalni naučni rad u okviru projekta osnovnih istraživanja broj ON142039.

[2] Bolívar J P, Martín J E, García-Tenorio R, Pérez-Moreno J P, Mas J L. Behaviour and fluxes of natural radionuclides in the production process of a phosphoric acid plant. Applied Radiation and Isotopes 2009;67/2:345-356.

[3] Nifontova M G. Use of lichens and mosses for on-line testing of environmental radioactive contamination. Russian J Nondestructive Testing 2005;41/1:60-63.

[4] http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEA-AQ-15_web.pdf

[5]http://nucleus.iaea.org/rpst/ReferenceProducts/Proficiency%5FTests/wwpt_2009_03.pdf

[6] Canberra. Genie 2000 Customization Tools Manual

[7] CMI (Czech Metrological Institute), Radioactive Standard Solutions, ER 25, ER X Prague, 2005

RADIONUCLIDE CONTENT DETERMINATION WITHIN THE INTERNATIONAL INTERCOMPARISON CAMPAIGNS – IAEA-CU-2008-03 AND IAEA-CU-2009-03

Mirjana Đurašević, Ivana Vukanac, Aleksandar Kandić, Bojan Šešlak and Zoran Milošević
Institute of Nuclear Sciences "Vinča", University of Belgrade, Serbia
mirad@vinca.rs

Laboratories accredited in accordance with ISO / IEC 17025:2006 have an obligation to participate periodicaly in intercomparison campaigns organised by international centres of excellence in the field of interest. These external quality control exercises confirm the accuracy, reliability and reproducibility of accredited methods.

European centers (IAEA, JRC, IRMM) have an obligation, as one of their regular activities, to organize and implement programs of intercomparison measurements. Manny of these programs relate to measurement of natural and artificial radionuclides in environmental samples. Laboratory for Nuclear and Plasma Physics, Institute "Vinča", participated in two worldwide open proficiency tests organised in 2008 and 2009 by the Group for Reference Materials under the IAEA:

- The IAEA-CU-2008-03: Determination of naturally occurring radionuclides in phosphogypsum and water.
- The IAEA-CU-2009-03: Determination of natural and artificial radionuclides in moss-soil and spiked water.

The results of measurements of phosphogypsum, moss soil and water samples are presented in this paper. The specific activities of naturally occurring gamma emitters originated from uranium and thorium series were determined in the phosphogypsum and moss soil samples. Besides them, the content of: ^{57}Co, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{54}Mn, ^{133}Ba and ^{152}Eu were determined in water samples.

The obtained results showed generally a very good agreement with referent values of specific activities given by IAEA. The accuracy and precision of the reported results were acceptable. The comprehensive analysis of obtained results enabled the elimination of the observed oversights and the improvement and validation of method for gamma spectrometric analysis of environmental samples.

THE FUNDAMENTALS OF THE AIR SAMPLER CALIBRATION-VERIFICATION PROCESS

Frank M. Gavila
F&J SPECIALTY PRODUCTS, INC., Ocala, Florida, USA 34472
fandj@fjspecialty.com

INTRODUCTION

The calibration of an air sampling instrument using a reference air flow calibrator requires attention to scientific detail in order to establish that the instrument's reported values are correctly stated and valid under the actual operating conditions of the air sampling instrument.

[1] DEFINITIONS

For the purposes of this paper, the following definitions shall apply:

Gas of Interest:	Air
Indicated Flow (F_{ind}):	The uncorrected volumetric air flow measured at the flow sensor under the actual conditions of temperature and pressure existing at the flow sensor after air circuitry line losses, pressure drop across the filters and dust loading conditions, if pertinent
Ambient Flow (F_{amb}):	The indicated air flow corrected to the dynamic conditions of local ambient temperature and pressure by either manual calculation or instrument calculation
Reference Flow (F_{ref}):	The indicated airflow corrected to fixed values of temperature and pressure conditions mandated by a regulatory agency or selected by the organization performing the air sampling activities. Often the reference flow is referred to as "Standard Flow" or "STP flow"
Reference Instrument (REF)	The instrument that reports a conventionally true value (CTV)
Device Under Test (DUT)	The instrument whose reported values are being compared to a REF

Calibration – Verification	The process of comparing a DUT against a REF to determine whether the DUT's reported results are within the manufacturer's stated accuracy range
Instrument Calibration	The process of adjusting one or more components of an instrument (DUT) to improve its reported values relative to the conventionally true value of a REF. The adjustment process can imply an automated computerized calibration of multiple sensors that interact dynamically to produce the best value or can be as simple as adjusting a potentiometer or a needle valve.

[2] THE BASICS OF THE IDEAL GAS LAWS

The ideal gas laws are utilized to normalize gas volumes, and/or volumetric gas flow rates (volume per unit of time) to a particular set of temperature and pressure conditions because the volume of a gas (air in our case) is a function of the temperature and pressure conditions at which the gas exists.

Charles' Law [1]

The volume of an ideal gas, V, when pressure and the molar mass are constant, is directly proportional to the absolute temperature T of the gas (as temperature increases the volume of a gas increases).

$$V \alpha T \tag{1}$$

Boyle's Law [2]

The pressure and volume of an ideal gas are inversely proportional (while one increases the other decreases) when the temperature and the molar mass of the gas are kept constant.

$$V \alpha \frac{1}{P} \tag{2}$$

Combination of Charles' Law and Boyle's Law [3]

$$V_2 = V_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \tag{3}$$

[3] THE OBJECTIVE OF AN AIR FLOW CALIBRATION-VERIFICATION

The primary objective of an air flow calibration-verification is to ensure that the DUT is within the manufacturer's stated accuracy range of temperature, pressure and humidity conditions under which the instrument was designed to operate.

The DUT output values are compared to those obtained from a reference instrument (REF) measuring the sample physical parameter that the DUT is measuring.

An accurate comparison of air flow rates or air volumes requires that the comparison of the DUT and REF values be made under the same temperature and pressure conditions, in accordance with the Ideal Gas Laws discussed in section 2 above. Therefore, the calibration technician must know what the *T* and *P* conditions are for each one of the displayed flow rate values of the DUT and the REF instruments during the calibration-verification process.

It is proper to note that the required volume correction formula to be utilized for an analog flow sensor may not be linear.

For example, rotameters [3], as well as venturi, orifice and other volumetric differential pressure sensors, require the application of a square root version of the combination of Charles' and Boyle's law equations. The equation applicable to variable area rotameters is presented in formula (4) below:

$$F_{REF} = F_{ind}\sqrt{\frac{T_{REF}}{T_{ind}}} \cdot \frac{P_{ind}}{P_{REF}} \qquad (4)$$

If both instruments (DUT and REF) display corrected values, but the *T* and *P* conditions are different, the Ideal Gas Law equations can be utilized by correcting the DUT output as described in formula (5) below and compared to the flow value displayed by the REF.

$$F_{REF} = F_{DUT}\left(\frac{T_{REF}}{T_{DUT}}\right) \cdot \left(\frac{P_{DUT}}{P_{REF}}\right) \qquad (5)$$

[4] REQUIRED ACCURACY OF THE REF RELATIVE TO THE DUT

If is absolutely necessary that the REF be more accurate than the DUT; otherwise, it can not be considered a reference instrument.

How much more accurate?

The REF should be at least twice as accurate and, if possible, it should be four times as accurate as the DUT. For example, Table 1 below lists the recommended minimum and preferred accuracies that the REF should have for a given DUT accuracies.

Table 1. Minimum and Preferred Reference Instrument Accuracy Relative to the Accuracy of the Device Under Test

DUT Accuracy (± %)	**Minimum REF Accuracy** (± %)	**Recommended REF Accuracy** (± %)
10	5.0	2.5
8	4.0	2.0
6	3.0	1.5
4	2.0	1.0

[5] TYPE OF ACCURACIES:

Full Scale Accuracy (FS) *vs.* At Reading Accuracy

Monitoring instruments have an accuracy stated either on the instrument nameplate label or in the operator manual.

Instruments having an accuracy related to **Full Scale** require the indication of the observed value ± the absolute value of error calculated by formula 6 below.

$$\text{Absolute Error} = \%\ \text{FS accuracy} \times \text{Top of Range Flow Value} \qquad (6)$$

For example, an air sampler that has a ± 4 % FS accuracy and whose top-of-the-measurement range is 100 LPM has a ± 4 LPM error anywhere within the operating range. Thus, a measurement made at 30 LPM should be expressed as 30 ± 4 LPM. If the measurement is made at 90 LPM the value should be expressed as 90 ± 4 LPM.

If the instrument has an **At Reading** accuracy of ± 4 % the accuracy is more precise and is expressed as 30 LPM ± 1.2 LPM. As the value of the reading increases, the absolute value of the possible error also increases.

[6] STATISTICS OF AN AIR FLOW CALIBRATION

The calibration or calibration-verification of a DUT with a REF involves at least two measurements and that both of them display output values at the same reference *T* and *P* conditions. In this ideal case the maximum accuracy that can be assigned to the output values of the DUT is determined by formula (7)

$$TotalError\left(E_T\right) = \sqrt{E^2{}_{REF} + E^2{}_{DUT}} \qquad (7)$$

For a DUT having a manufacturer's stated accuracy of ± 8 % FS and a REF having a manufacturer's stated accuracy of ± 4 % FS, the maximum accuracy assignable to the DUT is represented by implementing formula (7), utilizing the accuracy values stated above.

$$E_T = 100\sqrt{(0.08)^2 + (0.04)^2} = \sqrt{0.0080} = 9\% \qquad (8)$$

[7] CALIBRATION-VERIFICATION *vs.* CALIBRATION

There are DUTs that enable a technician to adjust their flow rate to match that of the REF more closely when there are one or more points in the initial calibration-verification procedure outside of the manufacturer's stated accuracy range. Rotameters may have top mounted needle valves that adjust back pressure, magnehelic gauges have adjustment screws, mass flow meters may have potentiometers, etc.

If the instruments do not provide such an adjustment, then only a calibration-verification can be made with the DUT. The DUT must be sent to the manufacturer for the latter to assess the out-of-tolerance condition and perform the repair work, followed by a factory recalibration.

An air flow measurement instrument is calibrated when one or more sensors or components can be adjusted to provide a volumetric flow rate within the instruments designed accuracy over the instrument's entire operating range.

If there are some points at the top or bottom of the operating range that can not be adjusted to be within the manufacturer's stated accuracy range, then, it may be appropriate to declare the DUT a "Limited-Use-Instrument" and the instrument should only be operated as such.

[8] DOCUMENTATION OF DUT CALIBRATION ACCEPTANCE

Upon confirmation that the DUT meets the manufacturer's accuracy criteria, the technician must place a calibration sticker or label indicating the date of calibration, the expiration date of the calibration and an authorized signature. If it is a limited-use instrument, the label should state the limited-use operating range. The serial number and model number of the instrument should also be shown on the calibration sticker.

A specific calibration file for each instrument by serial # should be kept in the calibration laboratory file records.

CONCLUSION

Dissecting the many elements of an air sample instrument calibration or calibration-verification obliges air monitoring professionals to obtain a considerable amount of information about the DUT's accuracy, design operating conditions, possible flow sensor adjustment techniques and whether the instrument reports corrected flow rates at specified *T* and *P* conditions.

An effort must be made to utilize the most accurate REF that is economically acceptable in order to exceed, as much as possible, the accuracy of the DUTs utilized in one's air monitoring program.

Instruments that display gas flow or gas volume values corrected to a reference temperature and pressure are very desirable. The ideal situation is when both the DUT and the REF output flow rate or volume values are at the same conditions of *T* and *P*. The calibration-verification is, then, a simple process.

The credibility of an air flow calibration laboratory and of an air monitoring program is maximized by utilizing high quality REF and DUT instruments that are microprocessor-controlled and designed to display air flow rates and/or air volumes at recognized reference *T* and *P* conditions.

REFERENCES

[1] http://wikipedia.org/wiki/charles%27s_law

[2] http://wikipedia.org/wiki/Boyle%27s_Law

[3] Craig D K. The Interpretation of Rotameter Air Flow Reading. Health Physics 1971;21:328-332.

NEIONIZIRAJUĆA ZRAČENJA

NON-IONISING RADIATIONS

BIOMEDICAL APPLICATION OF ELECTROPORATION: ELECTROCHEMOTHERAPY AND ELECTROGENE THERAPY IN TREATMENT OF CUTANEOUS AND DEEP SEATED TUMORS

Gregor Serša, Maja Čemažar, Eldar Gadžijev, Ibrahim Edhemović, Erik Brecelj and Marko Snoj
Institute of Oncology Ljubljana, Ljubljana, Slovenia
gsersa@onko-i.si

BIOMEDICAL APPLICATIONS OF ELECTROPORATION

Several novel tumor-targeting and drug delivery approaches in cancer treatment are currently undergoing intensive investigation in order to increase the therapeutic index – among them physical approaches such as tissue electroporation. Electroporation of tissue increases the membrane permeability of cells, specifically in the area that is exposed to the applied electric pulses.

In the past 25 years, electroporation has proved to be effective in facilitating the transport of different molecules across the plasma membrane. By using short intense electric pulses, the plasma membrane becomes permeable to molecules otherwise deprived of membrane transport mechanisms. Although the exact mechanism operating on the molecular level and the various structures has not yet been fully elucidated, a flow of molecules was demonstrated through areas of membranes in regions where the highest absolute value of the induced transmembrane potential was observed after exposure of cells to electric pulses. The use of square-wave electric pulses of suitable duration and amplitude preserves the viability of cells, allowing for resealing of the cell membrane a few minutes after the application of electric pulses [1].

Electroporation-based cancer treatment approaches are currently undergoing intensive investigation in the field of drug (electrochemo-therapy) and gene (electrogene therapy) delivery [1,2].

ELECTROCHEMOTHERAPY

The first biomedical application of electroporation in the treatment of cancer came in the form of electrochemotherapy, which, since its beginnings in the late 1980s, has evolved into a clinically verified treatment

approach for cutaneous and subcutaneous tumor nodules. Electrochemotherapy is defined as a local treatment which, via cell membrane permeabilising electric pulses, potentiates the cytotoxicity of non-permeant or poorly permeant anticancer drugs with high intrinsic cytotoxicity at the site of electric pulse application.

Since electroporation can facilitate the drug transport through the cell membrane only for poorly or non-permeant molecules, suitable candidates for electrochemotherapy are limited to those drugs that are hydrophilic and lack transport system in the membrane. Several drugs were tested; however, only two drugs have been identified as potential candidates for electrochemotherapy of cancer patients. The first is bleomycin, which cytotoxicity *in vitro* can be potentiated up to several-1000-fold by electroporation of cells. The second is cisplatin. Electroporation of cells exposed to cisplatin increased the cisplatin cytotoxicity by up to 80-fold.

Bleomycin and cisplatin were tested in electrochemotherapy protocol on a number of animal models *in vivo*. High antitumor effectiveness of electrochemotherapy was demonstrated on fibrosarcomas, melanoma, and carcinomas in mice, rats and rabbits; good clinical results were also obtained in veterinary medicine on cats, dogs and horses. Also, the drug administration route (intravenous or intratumoral), drug dosage, timing of its administration and electrical parameters were elaborated. It was determined that the drugs may be injected either intravenously or intratumorally and electric pulses applied to the tumors within a few minutes thereafter. In these studies it was demonstrated that with drug doses that have minimal or no antitumor effectiveness, high (up to 75 %) complete responses of the electrochemotherapy-treated tumors were obtained. The drug doses used were so low that they had no systemic toxicity. Also the application of electric pulses to the tumors had no antitumor effectiveness and no systemic side effects. Local side effects were contractions of the muscles underlying the treated area, but muscle contractions and associated pain are present only during the application of electric pulses.

The principal mechanism of electrochemotherapy is the electroporation of cells in tumors, which increases drug effectiveness by enabling the drug to reach the intracellular targets. This increased drug uptake in tumors has been demonstrated for bleomycin and cisplatin: the accumulation of these two drugs in tumors was increased two to fourfold, compared to tumors without electroporation. Furthermore, a twofold increase in cisplatin DNA adducts was determined in electroporated tumors.

Besides membrane electroporation, the application of electric pulses to tissues induces a transient but reversible reduction of blood flow. The 80 % decrease in tumor blood flow immediately following the application of electric pulses induces drug entrapment in the tissue for several hours, providing more time for the drug to act. Tumor blood flow returns to normal in tumors within 24 h after the application of electric pulses.

The cytotoxic effect of electrochemotherapy is not limited only to tumor cells. Electrochemotherapy acts also on stromal cells, including endothelial cells in the lining of tumor blood vessels, resulting in their death, abrogation of tumor blood flow and consequently a cascade of tumor cell death surrounding the vessels. This vascular disrupting mechanism of electrochemotherapy contributes to its antitumor effectiveness and has been demonstrated for both bleomycin and cisplatin.

Differences in the antitumor effectiveness of electrochemotherapy were observed between immunocompetent and immunodeficient experimental animals, indicating the involvement of immune response in antitumor effectiveness. Due to massive tumor antigen shedding in organisms after electrochemotherapy, systemic immunity is induced and can be up-regulated by additional treatment with biological response modifiers such as IL-2, IL-12, GM-CSF and TNF-α [1,3,4].

CLINICAL STUDIES ON ELECTROCHEMOTHERAPY

The results of several clinical studies have confirmed the preclinical data described above: high antitumor effectiveness of electrochemotherapy with bleomycin and cisplatin on cutaneous and subcutaneous tumor nodules with different histology was demonstrated.

The first clinical study was published in 1991 on head and neck tumor nodules, which was thereafter followed by several others. These clinical studies demonstrated the antitumor effectiveness of electrochemotherapy using either bleomycin or cisplatin, given intravenously or intratumorally. In addition to single or multiple cutaneous or subcutaneous melanoma nodules, a response was demonstrated in breast and head and neck cancer nodules, as well as Kaposi's sarcoma, hypernephroma, chondrosarcoma and basal cell carcinoma. However, these clinical studies were performed with slightly variable treatment protocols, different electrodes and different electric pulse generators. Thus there was a need for a prospective multi-institutional study, which was conducted by a consortium of four cancer centers gathered in the ESOPE project funded under the EU 5th Framework Programme. In this study, treatment response after electrochemotherapy according to tumor

type, drug used, route of its administration and type of electrodes was tested. The results of this study can be summarized as follows: (1) An objective response rate of 85 % (74 % complete response rate) was achieved for electrochemotherapy-treated tumor nodules, regardless of tumor histology and drug or route of administration used. (2) At 150 days after treatment, the local tumor control rate for electrochemotherapy was 88 % with bleomycin given intravenously, 73 % with bleomycin given intratumorally and 75 % with cisplatin given intratumorally, demonstrating that all three approaches were equally effective in local tumor control. (3) Side effects of electrochemotherapy were minor and tolerable (muscle contractions and pain sensation).

The studies that followed demonstrated the same antitumor effectiveness as the ESOPE study. Currently electrochemotherapy is in clinical use in more than 60 European cancer centers for treatment of cutaneous tumor nodules. Predominantly melanoma metastases were treated; therefore electrochemotherapy has been included also into European guidelines for treatment of melanoma [5,6].

Furthermore, the technology is being developed also for the treatment of deep seated tumors. With development of new generation of electric pulse generators, tumors located in liver, muscle or bone can be treated, using long needle electrode that are inserted into the tumor or the surrounding normal tissue [7]. On the 1st Users meeting for electrochemotherapy in Bologna, Italy in 2010, the first promising clinical results were reported. In this way electrochemotherapy will broaden its clinical indications and will be even better accepted in clinical practice.

ELECTROGENE THERAPY

Another application of electroporation is introduction of nucleic acids into the tissues like tumors, muscle or skin (electrogene therapy). The use of electroporation for transfection of cells dates back to 1982, when Neumann et al. demonstrated increased uptake of plasmid DNA into mouse lyoma cells using electroporation. Gene electrotransfer to tissues was introduced by Titomirov et al. in 1991, who used electroporation for transfection of skin of newborn mice with plasmid DNA. After this first study, the use of gene electrotransfer to tissues grew rapidly. Optimization studies aiming to optimize the parameters of electric pulses for application of gene electrotransfer to different tissues, as well as studies dealing with the therapeutic effect of gene electrotransfer were performed. Therapeutic

applications of gene electrotransfer were focused mainly on two fields: DNA vaccination against infectious disease, and cancer gene therapy [8,9].

Among different therapeutic genes, such as p53, STAT3, IL-2, AMEP that were tested in preclinical studies of electrogene therapy, electrogene therapy with interleukin-12 (IL-2) was the most thoroughly evaluated, even in combination with radiotherapy. To date, only intramuscular electrogene therapy with IL-12 was tested in combination with local radiotherapy. Combined treatment was evaluated on established subcutaneous sarcoma tumors and on induced lung metastases. IL-12 electrogene therapy repeated three times with one tumor irradiation applied 24 h after the first electrogene therapy resulted in up to 100 % tumor cures. Prophylactic electrogene therapy performed 24 h before irradiation resulted in almost complete reduction of lung metastases and a 1.3 fold dose-modifying factor was determined when electrogene therapy was combined with graded irradiation doses (Figure 1) [10].

Figure 1. Antitumor effectiveness of radiotherapy combined with electrogene therapy with IL-12 on induced lung metastases: A – lung from control untreated mouse; B – lung of mouse treated with 4 Gy irradiation and C – lung from mouse treated with combined therapy.

Electrogene therapy in oncology is also at the clinical stage of testing. It has been used for treatment of tumors of small animals like dogs and also horses, with significant antitumor effect, demonstrating the feasibility and effectiveness of this treatment. Furthermore, the treatment has been translated also into the human clinic; the latest report by Daud et al. [11] has demonstrated that electrogene therapy with IL-12, of melanoma tumor nodules in patients that have progressive disease, is effective and the patients have significant benefit of it. In Slovenia we also initiated the first gene therapy trial on melanoma patients with plasmid DNA encoding antiangiogenic gene and we are in preparation for the IL-12 gene therapy trial.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge the financial support of the state budget by Slovenian Research Agency (P3-0003).

REFERENCES

[1] Sersa G, Miklavcic D, Cemazar M, Rudolf Z, Pucihar G, Snoj M. Electrochemotherapy in treatment of tumours. Eur J Surg Oncol 2008;34:232-240.

[2] Cemazar M, Golzio M, Sersa G, Rols MP, Teissie J. Electrically-assisted nucleic acids delivery to tissues *in vivo*: Where do we stand? Curr Pharm Des 2006;12:3817-3825.

[3] Gothelf A, Mir LM, Gehl J. Electrochemotherapy: results of cancer treatment using enhanced delivery of bleomycin by electroporation. Cancer Treat Rev 2003; 29:371-387.

[4] Cemazar M, Tamzali Y, Serša G, Tozon N, Mir LM, Miklavcic D, Lowe R, Teissie T. Electrochemotherapy in veterinary oncology. J Vet Int Med 2008; 22:826-831.

[5] Marty M, Serša G, Garbay JR, Gehl J, Collins CG, Snoj M, Billard V, Geertsen PF, Larkin JO, Miklavcic D, Pavlovic I, Paulin-Kosir SM, Cemazar M, Morsli N, Soden DM, Rudolf Z, Robert C, O'Sullivan GC, Mir LM. Electrochemotherapy – An easy, highly effective and safe treatment of cutaneous and subcutaneous metastases: Results of ESOPE (European Standard Operating Procedures of Electrochemotherapy) study. EJC Suppl 2006;4:3-13.

[6] Testori A, Tosti G, Martinoli C, Spadola G, Cataldo F, Verrecchia F, Baldini F, Mosconi M, Soteldo J, Tedeschi I, Passoni C, Pari C, Di Pietro A, Ferrucci PF. Electrochemotherapy for cutaneous and subcutaneous tumor lesions: a novel therapeutic approach. Dermatol Ther 2010;23:651-661.

[7] Miklavcic D, Snoj M, Zupanic A, Kos B, Cemazar M, Kropivnik M, Bracko M, Pecnik T, Gadzijev E, Sersa G. Towards treatment planning and treatment of deep-seated solid tumors by electrochemotherapy. BioMedical Engineering OnLine 2010;9:10.

[8] Cemazar M, Sersa G. Electrotransfer of therapeutic molecules into tissues. Curr Opin Mol Ther 2007;9:554-562.

[9] Bodles-Brakhop AM, Heller R, Draghia-Akli R. Electroporation for the delivery of DNA-based vaccines and immunotherapeutics: current clinical developments. Mol Ther 2009;17:585-92.

[10] Cemazar M, Jarm T, Sersa G. Cancer electrogene therapy with interleukin-12. Curr Gene Ther 2010;10:300-311.

[11] Daud AI, DeConti RC, Andrews S, Urbas P, Riker AI, Sondak VK, Munster PN, Sullivan DM, Ugen KE, Messina JL, Heller R. Phase I trial of interleukin-12 plasmid electroporation in patients with metastatic melanoma. J Clin Oncol 2008;26:5896-903.

NORME U PODRUČJU MJERENJA VISOKOFREKVENCIJSKOG ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA U SVRHU ZAŠTITE OD ŠTETNOG DJELOVANJA

Biljana Tanatarec[1] i Nenad Nikolić[2]
[1]Doron Net d.o.o., Zagreb
[2] Hrvatski zavod za norme, Zagreb
btanatarec@doron-net.hr , nenad.nikolic@hzn.hr

UVOD

Već smo se u svakodnevnome životu naučili živjeti sa zagađenjima različitih vrsta. Pri tome smo više ili manje upoznati sa zagađenjima koja su klasična i vidljiva poput zagađenja voda, zraka ili tla. U zadnje vrijeme uslijed stalnog razvoja tehnologije pojavljuju se i modernije vrste zagađenja koje nisu tako lako prepoznatljive u odnosu na klasično zagađenje poput neionizirajućeg i ionizirajućeg zračenja (UV zračenje, X-zračenje, gama zračenje …), vibracija, buke i dr.

Posljedice modernih zagađenja nisu do kraja istražene, a svakim danom se nailazi na sve novije rezultate pogubne po zdravlje i živote ljudi. Potrebno je stoga poznavati i mjeriti, analizirati, štititi se, kontrolirati i upravljati tim vrstama zagađenja i svesti ih u okvire u kojima je šteta koju čine u području prihvatljivog rizika. Ako uopće i možemo s današnjim saznanjima odrediti prihvatljive rizike za pojedine vrste zagađenja.

U tu svrhu izrađuju se norme čijim se korištenjem mogu poduzeti mjere kojima se ublažuje štetno djelovanje tih modernih oblika zagađenja. Jedno od područja takvog brzoširećeg zagađivanja je i područje visokofrekvencijskog (u daljnjem tekstu VF) elektromagnetskog (u daljnjem tekstu EM) zračenja. Bezgranično širenje mobilnih telekomunikacija uz prisutnost uređaja koji su dostupni i djeci, dovodi cjelokupnu ljudsku populaciju u životne uvjete u kakvima do sada nije živjela. Istraživanja u tome području još uvijek su nedostatna, a potrebno je odrediti i mjerila koja ukazuju na neprihvatljiv rizik po ljudsko zdravlje i živote. Sustav normi i zakonskih propisa u tome području tek se razvija i nije dovoljno poznat ni stručnjacima niti široj javnosti. Stoga je izuzetno važno poznavanje normi i njihov daljnji razvoj kako bi se ustanovio sustav kontrole i zaštite od štetnih posljedica.

OSNOVNE VELIČINE I NORME KOJE OPISUJU NEIONIZIRAJUĆE VF EM ZRAČENJE I NJEGOVE POSLJEDICE

Kako je opisano u literaturi [1-3], osnovne veličine koje se koriste u mjerenju i procjeni utjecaja VF zračenja na živote i zdravlje ljudi i okoliš su:

- Jakost električnog polja *(E)*: vektorska veličina koja pokazuje razinu električnog polja. Određena je silom na mirujući električni naboj, a izražava se u voltima po metru (V/m).
- Gustoća toka snage *(S)*: omjer snage i površine okomite na smjer širenja elektromagnetskog vala, a izražava se u vatima po metru kvadratnom (W/m^2).
- Specifična apsorbirana snaga *(SAR)*: mjera brzine apsorbiranja energije po jedinici mase biološkog tkiva, a izražava se u vatima po kilogramu (W/kg).

Osnovna norma iz područja mjernih jedinica i veličina je HRN EN 80000-6:2008*, Quantities and units – Part 6: Electromagnetism* (IEC 80000-6:2008; EN 80000-6:2008).

Najvažnija norma iz područja društvene odgovornosti je HRN ISO 26000:2010*,* Upute o društvenoj odgovornosti (ISO 26000:2010). U poglavljima *6.4.6 Labor practice issue 4: Health and safety at work* i *6.5.3 Environmental issue 1: Prevention of pollution* opisani su mogući osnovni problemi koje izaziva elektrosmog.

Zanimljivi noviji normativni dokumenti iz područja mjerenja i posljedica djelovanja VF EM zračenja su EN 50413:2008, *Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)* i CLC/TR 50442:2005, *Guidelines for product committees on the preparation of standards related to human exposure from electromagnetic fields.*

U Hrvatskoj su već duže vrijeme u uporabi norme: HRN EN 50357:2002, Procjena izloženosti ljudi elektromagnetskim poljima uređaja koji se upotrebljavaju u elektroničkome nadzoru proizvoda (EAS), radiofrekvencijskome prepoznavanju (RFID) i sličnim primjenama (EN 50357:2001), HRN EN 50360:2002, Norma za proizvode za pokazivanje sukladnosti pokretnih telefona s temeljnim ograničenjima koja se odnose na izloženost ljudi elektromagnetskim poljima (300 MHz – 3 GHz) (EN 50360:2001) i HRN EN 50361:2002, Osnovna norma za mjerenje gustoće apsorbirane snage koja se odnosi na izloženost ljudi elektromagnetskim poljima pokretnih telefona (300 MHz – 3 GHz) (EN 50361:2001).

Među najnovijim europskim dokumentima su EN 50364:2010, *Limitation of human exposure to electromagnetic fields from devices operating in the frequency range 0 Hz to 300 GHz, used in Electronic Article Surveillance (EAS), Radio Frequency Identification (RFID) and similar applications* i EN 50519:2010, *Assessment of workers' exposure to electric and magnetic fields of industrial induction heating equipment*.

OSNOVNI IZVORI EM ZRAČENJA

Izvori VF EM zračenja su antene radio i televizijskih odašiljača, radarske antene, antene stacionarnih odašiljača mobilne telefonije, antene osobnih uređaja mobilne telefonije, bežični telefonski uređaji i bežični alarmni uređaji, odašiljači i prijemnici bežičnih kompjuterskih mreža.

Neki od najvažnijih izvora niskofrekvencijskog (NF) EM zračenja su žice i kabeli visokonaponskih električnih vodova, dalekovodi, uređaji i postrojenja u sustavu prijenosa električne energije (transformatori i sl.).

Zagađenje iz tih izvora sastavni je dio elektrosmoga, sveukupnog zagađenja nastalog od izvora EM zračenja u nekom području. Njihov utjecaj na zdravlje iskazuje se u nekoliko oblika. Kumulativan je u odnosu na izvore odnosno štetnost se zbraja iz svih izvora. Također, kumulativan je u odnosu na frekvencije odnosno štetnost se zbraja po svim frekvencijama. Nema gotovo nikakvog ili postoji vrlo slabo vizualno, mirisno, zvučno ili vibracijsko upozorenje. Kumulativan je u odnosu na period izloženosti EM zračenju. Još uvijek nema dovoljno elaboriranih i pouzdanih medicinskih istraživanja pa se ovom problemu po zdravlje i dalje ne poklanja dovoljno pažnje u stručnim krugovima u odnosu na njegov značaj.

PREGLED OSNOVNIH HRVATSKIH, EUROPSKIH I MEĐUNARODNIH PROPISA I PREPORUKA U PODRUČJU IZLOŽENOSTI VF EM ZRAČENJU

Na temelju dosadašnjih rezultata medicinskih istraživanja i zahtjeva društva, u Republici Hrvatskoj kao i u svijetu na snazi su zakoni, propisi ili drugi zakonski akti čijim se korištenjem umanjuju moguće posljedice štetnog VF EM zračenja. Tim se zakonima uglavnom daju određeni pragovi vrijednosti iznad kojih se smatra da je rizik od takvog zračenja na tome mjestu neprihvatljiv zbog štetnosti po ljudsko zdravlje. Prema tim zakonima uvedene su i obveze mjerenja određenih parametara kako bi se ustanovilo jesu li takvi određeni pragovi premašeni kako bi se interveniralo. Intervencije su danas najčešće u smislu smanjenja snage samih izvora zračenja (raznih odašiljača) ili drugačijim rasporedom tih izvora odnosno procjenom situacije u okolišu, a manje u obliku neke konkretne osobne ili druge zaštite.

Tablica 1. Granične razine referentnih veličina za frekvencijsko područje sustava GSM 900

Propisi		**Područje izloženosti**	**Frekvencija** [MHz]	**El. polje** [V/m]
Pravilnici na snazi u RH [4,5]		PrI[i]	400 – 2000	$1{,}375\ f^{1/2}$
			925	41,82
		PoO[ii]	400 – 2000	$0{,}55\ f^{1/2}$
			925	16,73
International Commision on Non-Ionising Radiation Protection [6]	EU direktiva 2004/40/EC [7]	PrI	400 – 2000	$3\ f^{1/2}$
			925	91,24
	EU preporuka 1999/519/EC [8]	PoO	400 – 2000	$1{,}375\ f^{1/2}$
			925	41,82

[i] Područja profesionalne izloženosti (PrI) su područja radnih mjesta koja nisu u području povećane osjetljivosti i na kojima se pojedinci mogu zadržavati do 8 sati dnevno, pri čemu je kontrolirana njihova izloženost EM poljima.

[ii] Područja povećane osjetljivosti (PoO) su područja stambenih zona u kojima se osobe mogu zadržavati i 24 sata dnevno, škole, ustanove predškolskog odgoja, rodilišta, bolnice, smještajni turistički objekti, dječja igrališta te površine neizgrađenih parcela namijenjene prema urbanističkom planu za jednu od prethodno navedenih namjena.

Pregled područja elektrosmoga opisan je u prezentaciji [9]. Detalji o ostalim hrvatskim, međunarodnim i europskim normama dostupni su u literaturi [10-14], europski propisi iz područja zaštite od VF zračenja [15], a američke norme, preporuke i propisi iz područja mjerenja i zaštite od VF EM zračenja u izvorima podataka Federal Communications Commission [16].

ZAKLJUČAK

Opisane su najpotrebnije norme i zakonski dokumenti i preporuke koje bi trebao koristiti u svakodnevnom radu u području mjerenja, procjene izvora i posljedica i zaštite od EM zračenja. Pored tih normi postoji i specijalizirane norme za pojedino područje u području EM zračenja. U najnovije vrijeme dio normi ulazi u zakonodavstvo Europske unije pa se očekuje i njihova brza primjena i u Republici Hrvatskoj kroz hrvatske zakonske propise usklađene s propisima Europske unije. Predstavljen i opisan skup normi je stvarno minimalan i bitan skup normi u području VF EM zračenja, a kako se to područje sukladno potrebama društva širi, u narednoj budućnosti očekuju se i dodatne norme koje će uređivati pojedine dijelove tog područja.

LITERATURA

[1] Tanatarec B, Nikolić N. Norme potrebne za rad laboratorija u području visokofrekvencijskog elektromagnetskog zračenja. 3. savjetovanje Iskustva laboratorija u primjeni HRN EN ISO/IEC 17025, Hrvatsko mjeriteljsko društvo, Mali Lošinj, 2010.

[2] Europska norma EN 50383:2010, Basic standard for the calculation and measurement of electromagnetic field strength and SAR related to human exposure from radio base stations and fixed terminal stations for wireless telecommunication systems (110 MHz – 40 GHz).

[3] Hrvatska norma HRN EN 50383:2005, Osnovna norma za proračun i mjerenje jakosti elektromagnetskih polja i gustoće apsorbirane snage koja se odnosi na izloženost ljudi radijskim baznim postajama i nepokretnim krajnjim postajama u bežićnim telekomunikacijskim sustavima (110 MHz – 40 GHz) (EN 50383:2002). Hrvatski zavod za norme, Zagreb 2005.

[4] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja. Narodne novine 204/2003, 15/2004, 41/2008.

[5] Pravilnik o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu. Narodne novine 183/2004.

[6] International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP) Guidelines: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Phys 1998;74(4):494-522.

[7] Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). Official Journal of the European Union L 159 of 30 April 2004.

[8] European Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (1999/519/EC), Official Journal of the European Communities, L 197 of 30 July 1999, pp 59-70.

[9] Biljana Tanatarec: Electrosmog pollution, ISO/HZN National Workshop on Social Responsibility, HZN, Zagreb 2010. Dostupno na: http://www.hzn.hr/pdf/SR_BiljanaTanatarec.pdf

[10] www.hzn.hr

[11] www.iso.org

[12] www.iec.ch

[13] www.cen.eu

[14] www.cenelec.eu

[15] www.eur-lex.europa.eu

[16] http://www.fcc.gov/oet/ea/fccid/

STANDARDS FOR MEASUREMENTS IN THE FIELD OF HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION FOR THE PURPOSE OF PROTECTION AGAINST ADVERSE HEALTH EFFECTS

Biljana Tanatarec[1] *and Nenad Nikolić*[2]
[1]Doron Net d.o.o., Zagreb, Croatia
[2]Croatian Standards Institute, Zagreb, Croatia
btanatarec@doron-net.hr , nenad.nikolic@hzn.hr

In this paper standards for measurements in the field of high frequency electromagnetic radiation are described with a view to protection from its hazardous action. Beside the standards which directly deal with high frequency electromagnetic radiation measurements, guidelines which describe hazardous influences of high frequency electromagnetic radiation on human body in the form of specific absorption rate (SAR) are given. Special attention is dedicated to standards and regulations, which are dealing with social responsibility, as well as with social responsibility in the field of high frequency radiation. This area is new and insufficiently known, rarely extended in everyday life.

DOSIMETRY METHODS FOR HUMAN EXPOSURE TO NON-IONISING RADIATION

Dragan Poljak[1], Cristina Peratta[2], Andres Peratta[2], Antonio Šarolić[1] and Vicko Dorić[1]
[1]University of Split, Croatia
[2]Wessex Institute of Technology, UK
dpoljak@fesb.hr

INTRODUCTION

The paper deals with human exposure to electromagnetic fields from extremely low frequencies (ELF) to GSM frequencies. The problem is twofold, i.e. it requires the assessment of external field generated by electromagnetic interference (EMI) source at a given frequency (incident field dosimetry) and then the assessment of corresponding fields induced inside the human body (internal field dosimetry). Several methods used in theoretical and experimental dosimetry are discussed within this work. Theoretical dosimetry models at low frequencies are based on quasistatic approaches, while analyses at higher frequencies use the full-wave models. Experimental techniques involve near and far field measurement, respectively. Human exposure to power lines, transformer substations, power line communication (PLC) systems, Radio Frequency Identification (RFID) antennas and GSM base station antenna systems is analyzed. The results obtained from calculation and/or measurement procedures are compared to the exposure limits proposed by relevant safety guidelines.

AN OUTLINE OF THE DOSIMETRY METHODS

Theoretical incident dosimetry used in this paper is based on the set of Pocklington integro-differential equations for the calculation of the current distribution and subsequently radiated field from power lines given by [2]:

$$E_{sm}^{exc}(s) = \frac{j}{4\pi\omega\varepsilon_0}\sum_{n=1}^{N_w}\int_0^{L_n}\left\{\left[k_1^2\vec{e}_{s_m}\vec{e}_{s_n'} - \frac{\partial}{\partial s_m \partial s_n'}\right]g_{0n}(s_m, s_n') + \right. \tag{1}$$

$$\left. + R_{TM}\left[k_1^2\vec{e}_{s_m}\vec{e}_{s_n^*} - \frac{\partial}{\partial s_m \partial s_n^*}\right]g_{in}(s_m, s_n) + (R_{TE} - R_{TM})\vec{e}_{s_m}\vec{e}_p \cdot \left[k_1\vec{e}_p\vec{e}_{w*} - \frac{\partial}{\partial p \partial s*}\right]g_i(s_m, s_n^*)\right\} I(s_n')ds'$$

while E^{exc} is the corresponding excitation function, where N is the total number of wires and $I_n(x')$ is the unknown current distribution induced on the n-th wire, $g_{0mn}(x,x`)$ and $g_{imn}(s,s`)$ are related Green functions:

$$g_{0mn}(s_m, s_n^{'}) = \frac{e^{-jk_1 R_{1mn}}}{R_{1mn}}, \quad g_{imn}(s_m, s_n^{'}) = \frac{e^{-jk_1 R_{2mn}}}{R_{2mn}} \tag{2}$$

where index *0* and *i* are related to the source and image wire, respectively, and R_{1mn} and R_{2mn} are distances from the source point and from the corresponding image, respectively, to the observation point of interest and $k_1 = \omega\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ k_1 is the propagation constant of free space.

The influence of a lossy ground is taken into account via the Fresnel plane wave reflection coefficient for TM and TE polarization [2]:

$$R_{TM} = \frac{\underline{n}\cos\theta' - \sqrt{\underline{n} - \sin^2\theta'}}{\underline{n}\cos\theta' + \sqrt{\underline{n} - \sin^2\theta'}}; \qquad R_{TE} = \frac{\cos\theta' - \sqrt{\underline{n} - \sin^2\theta'}}{\cos\theta' + \sqrt{\underline{n} - \sin^2\theta'}} \tag{3}$$

where $\underline{n} = \frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_0}$ is the refraction index, $\varepsilon_{eff} = \varepsilon_r \varepsilon_0 - j\frac{\sigma}{\omega}$ is the complex permittivity of the ground and θ' is the angle of incidence.

The total electric field irradiated by an arbitrary wire configuration is obtained from expression [1]:

$$\vec{E} = \frac{}{j4\pi\omega\varepsilon_0} \sum_{n=1}^{N} \left\{ \begin{array}{l} \left[k_1^2 \int_0^{L_n} \vec{e}_{s_n'} I(s_n) g_{0n}(\vec{r}, \vec{r}') ds_n + \int_0^{L_n} \frac{\partial I(s_n')}{\partial s_n'} \nabla g_{0n}(\vec{r}, \vec{r}') ds_n \right] + \\ R_{TM} \left[k_1^2 \int_0^{L_n} \vec{e}_{s_n^*} I(s_n) g_{in}(\vec{r}, \vec{r}') ds_n - \int_0^{L_n} \frac{\partial I(s^*)}{\partial s^*} \nabla g_{in}(\vec{r}, \vec{r}') ds_n \right] + \\ + \left(R_{TE} - R_{TM}\right) \left(\left[k_1^2 \int_0^{L_n} \vec{e}_{s_n^*} I(s_n) g_{in}(\vec{r}, \vec{r}') ds_n - \int_0^{L_n} \frac{\partial I(s^*)}{\partial s^*} \nabla g_{in}(\vec{r}, \vec{r}') ds_n \right] \cdot \vec{e}_p \right) \vec{e}_p \end{array} \right\} \tag{4}$$

Experimental incident dosimetry techniques involve measurement techniques of fields radiated by RFID antennas and GSM base station antennas. The internal dosimetry at low frequency is based on the corresponding Laplace equation for the scalar potential φ [2]:

$$\nabla\left(\sigma + j\omega\varepsilon\right)\nabla\varphi = 0 \tag{5}$$

and appropriate boundary conditions. The equations (1), (4) and (5) are handled via certain Boundary Element Method (BEM) procedures [2].

CALCULATED AND MEASURED RESULTS

First example set of numerical results is related to the internal dosimetry of realistic well-grounded body model exposed to vertical component of the electric field E = 10 kV/m generated by high voltage power line. Figure 1 shows the current density induced along the body for the simplified cylindrical representation and realistic HNA model [2].

Figure 1. Induced current density along the body

Note, that the results obtained via the HNA model exceed the ICNIRP basic restrictions [3] for public exposure (2 mA/m^2) in knee (8.6 mA/m^2) and neck (9.8 mA/m^2) and for occupational exposure (10 mA/m^2) in ankle (32 mA/m^2).

Figure 2a shows the conceptual model of a realistic 1.75 m tall human body inside a transformer substation room (2.5 m × 1.6 m × 2 m) touching a control panel (1 m × 2 m) at the potential φ_0 = 400 V. Two scenarios for dry-air between worker's hand and panel are considered: d = 0.016 m and d = 0.116 m. The floor is kept grounded and all other surfaces of the room are considered with Neumann adiabatic type conditions [2]. Figure 2b shows the current density induced along the body using homogeneous (Ho) and heterogeneous (H) models for two different scenarios. In this case the values of internal current density do not exceed ICNIRP basic restrictions.

Next computational example is related to a simple PLC circuit, Figure 3a, (distance between the poles, L = 200 m, conductor radius a = 6.35 mm, the heights above ground: h_1 = 10 m, and h_2 = 11 m).

Figure 2. a) The conceptual model b) Internal current density

The conductor sag is $s = 2$ m and ground parameters are: $\varepsilon_r = 13$, $\sigma = 0.005$ S/m. The impressed power is $P = 1$ mW while the operating frequency is changed from 1 MHz to 30 MHz. The impedance load is $Z_L = 50\ \Omega$.

Figure 3. a) A simple PLC system b) Field at height $z = 1.75$ m

Figure 3b shows the maximum values of the z component of the radiated electric field computed in the frequency range from 1 MHz to 30 MHz. The related internal current densities along the body are calculated for the frequency range from 1 MHz to 10 MHz using the cylindrical body representation [2]. The maximal value of current density $J_{max} = 78\ \mu A/m^2$ is obtained at $f = 8$ MHz. Furthermore, the whole body average SAR is determined using the parallelepiped body representation [4] up to 30 MHz. The maximal value of $SAR_{WB} = 0.056$ nW/kg is obtained at $f = 25$ MHz. According to the ICNIRP the effects of simultaneous exposure to the fields of different frequencies are additive in nature, i.e. for exposure to PLC fields it follows:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} = 1.31 \cdot 10^{-4} << 1, \quad \text{and} \quad \sum_{i=1\text{MHz}}^{10\text{MHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} = 8.93 \cdot 10^{-9} << 1 \quad (6)$$

where $J_{L,i}$ denotes the limit at given frequency and SAR_L = 0.08 W/kg for general population. Obviously, the levels of the induced current density and SAR_{WB} due to the radiation of the outdoor PLC system are rather far below the ICNIRP exposure limits.

Next example is related to human exposure to the magnetic field generated from RFID shop-anti theft protection system, Figure 4a. The input power is P = 50 mW per loop antenna. The wire radius is 0.9 mm, while the side length of the wire square loop is 46.5 cm. Figure 4b shows the measured magnetic field distribution along the vertical line from $z = 0$ to $z = 2$ m, corresponding to a human standing beside the system, at a diagonal distance of approx. 1.8 m from the center of the antenna system (x = 1.3 m, y = 1.3 m), thus representing an employee exposure to the anti-theft gate for a longer period.

a) b)

Figure 4. a) Gate antenna system used measurement; b) Magnetic field intensity along the vertical line, x = 1.3 m, y = 1.3 m, from z = 0 to z = 2 m

The measured field value of 1.1 mA/m^2 is significantly below ICNIRP reference levels (160 mA/m^2 for workers and 73 mA/m^2 for general population.

The last example deals with the experimental incident dosimetry of GSM base station antennas. The source of GSM radiation is the roof-top antenna system (Figure 5) in a sectorial arrangement mounted at height 48 m above ground. The radiated power per channel is P = 955 W at f = 935 MHz.

Figure 5. A view to two sectors of the base station antenna system

The electric field measured in a flat at 15th floor below antenna system at approximated distance of 8 m from the radiation source is $E = 0.23$ V/m, which is rather negligible compared to the ICNIRP reference level $E_{lim} = 42$ V/m.

CONCLUDING REMARKS

The paper reviews some dosimetry methods for human exposure to electromagnetic fields from ELF to GSM frequencies. Various exposure scenarios related to fields generated from power lines, transformer substations, PLC systems, RFID and GSM antennas are analyzed. The obtained results from calculation and/or measurement mostly stay within the exposure limits proposed by ICNIRP safety guidelines.

REFERENCES

[1] Poljak D, Doric V, Milisic M, Birkic M. Modeling of Array of Log-periodic Dipole Antennas Array for Air Traffic Applications. In: Bonefačić D, Bosiljevac M, eds. CD-ROM Proceedings of ICECom 2010: 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications. September 20-23, 2010; Dubrovnik, Croatia. Zagreb: KoREMA; 2010.

[2] Poljak D. Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

[3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Phys 1998;74(4):494-522.

[4] Poljak D. Human Exposure to Electromagnetic Fields, WIT Press, Southampton-Boston, 2003.

PROFESIONALNA IZLOŽENOST OBALNIH MOTRITELJA NEIONIZIRAJUĆEM ZRAČENJU

Senijo Pažanin[1] *i Antonio Šarolić*[2]
[1]Zavod za pomorsku medicinu, Split
[2]Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
spazanin@yahoo.com , antonio.sarolic@fesb.hr

UVOD

Obalni motritelji su djelatnici Hrvatske ratne mornarice (HRM), koji na postajama obalnog motrenja (POM) provode nadzor akvatorija i zračnog prostora hrvatskog Zaštićenog ekološko-ribolovnog pojasa (ZERP). Mreža postaja nalazi se u cijeloj dužini naše obale, s pomorskim radarima na dominantnim uzvisinama obale ili otoka prema morskoj pučini.

Obalni motritelji borave na POM-u u višednevnim turnusima. Za vrijeme boravka na postaji rade u smjenama kao poslužitelji radarskih sustava i vizualni motritelji. Na POM-ovima se, osim radara, redovito nalaze i drugi izvori neionizirajućeg zračenja. Zbog povoljnih lokacija na uzvisinama, na istim lokacijama su redovito instalirane i radijske postaje drugih korisnika (pomorske komunikacije, policija, vatrogasci, mobilna telefonija, radio difuzija itd.).

Utjecaj neionizirajućeg zračenja na ljude analiziran je u znanstvenoj i stručnoj literaturi, te je utvrđena potreba provođenja zaštite ljudi od izlaganja jakim elektromagnetskim (EM) poljima. U ovom radu prikazani su uvjeti rada motritelja s tipičnim rezultatima mjerenja EM polja na POM-u i analizom u skladu s relevantnim dokumentima [1-6].

UVJETI RADA MOTRITELJA

Radna izloženost obalnog motritelja na postajama je u turnusima od po 7 dana. U dnevnim smjenama motri dva puta po četiri sata, a između motrenja ima po 8 sati pauzu za odmor ili druge aktivnosti. Ukupno motri 8 sati u 24 sata. Noćni nadzor obavlja pomoću radara (radarsko motrenje), a danju motri vizualno iz motriteljskog tornja ili s vanjske terase uglavnom pomoću dalekozora, i rjeđe pomoću radara.

Zdravstvene preglede motritelja provodi Zavod za pomorsku medicinu (ZPM Split) Vojno-zdravstvenog središta Zapovjedništva za potporu Oružanih snaga RH. Pregledi se provode po utvrđenom protokolu i pomoću

Upitnika za djelatnike profesionalno izložene neionizirajućem zračenju [7]. Detaljan zdravstveni pregled sadrži iscrpnu osobnu i radnu anamnezu uzetu pomoću posebnog Upitnika za radariste. Detaljan klinički pregled i obrada obuhvaća opće i posebne laboratorijske pretrage i dijagnostičke postupke s naglaskom na organe i organske sustave izložene EM odnosno neionizirajućim zračenjima. Metodologija pregleda utvrđuje opću i posebnu zdravstvenu sposobnost s naglaskom na izložene tjelesne sustave: oči, kožu, krv i krvotvorne organe, srčanožilni sustav, metabolički sustav.

ZPM Split planira i provodi redovite nadzore uvjeta života i rada, kao i štetnosti na radnom mjestu motritelja na radarskim postajama. Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu (FESB Split) je za HRM proveo mjerenja radiofrekvencijskih (RF) EM polja radijskih postaja na POM-ovima, kako bi se ustanovila usklađenost razina zračenja s propisanim graničnim vrijednostima.

Citogenetička analiza uzoraka prikupljenih na pregledima poslužila je za istraživanje citogenetičkih oštećenja i oksidacijskog stresa kod motritelja izloženih neionizirajućem zračenju [8].

METODE MJERENJA EM POLJA

Mjerni komplet za frekvencijski selektivno mjerenje sastoji se od kalibriranih antena (ARC Seibersdorf PCD8250, Schwarzbeck SBA 9112, Sivers Lab PM 7320 X/01), analizatora spektra (Anritsu MS2724B) i kalibriranih mjernih kabela.

Vektor polja u prostoru općenito ima nepoznatu polarizaciju. Stoga je potrebno linearno polariziranom antenom pažljivo izmjeriti sve tri ortogonalne polarizacije (x, y, z) mjerenog polja.

Potrebno je naročito obratiti pozornost na signale koji se ne odašilju kontinuirano u vremenu, već isprekidano. Takve signale tipično proizvodi radar koji je impulsno moduliran. Tipično trajanje impulsa u radarskim sustavima je reda veličine mikrosekunde (μs), a trajanje stanke je reda veličine milisekunde (ms). Na analizatoru spektra je potrebno moći razlučiti efektivno od vršnog polja, za što je potrebno poznavanje načela i metoda RF i mikrovalnih mjerenja impulsnih signala.

Na svim postajama obalnog motrenja obavljena su mjerenja zračenja u prostorima koji su motriteljima na raspolaganju za boravak i kretanje: u radnim prostorima motriteljskog tornja, u zatvorenim prostorima (dnevnim i spavaćim sobama) te na dostupnim otvorenim prostorima. Mjerenje je provedeno na devet postaja obalnog motrenja.

Mjerenjem su obuhvaćeni svi izvori koji su fiksno postavljeni na području postaje. Broj i vrsta izvora se donekle mijenjaju od postaje do postaje. Tipični izvori i njihove frekvencije su:

- odašiljač lokalne FM radijske postaje: 87,5 – 108 MHz
- VHF odašiljač za pomorske komunikacije: 156 – 174 MHz
- TETRA – profesionalna mobilna mreža: 380 – 400 MHz
- bazna stanica GSM sustava: 935 – 960 MHz
- radarski sustavi (GEM S / Enhanced Peregrine / GEM X): 3 GHz / 5,4 – 5,9 GHz / 9,4 GHz.

REZULTATI

Prikaz mjernih rezultata ne uključuje sve mjerene mikrolokacije, već tri reprezentativne mikrolokacije koje se mogu zateći na svakoj postaji: operativni centar (radno mjesto motritelja), dnevni boravak i spavaona.

U Tablici 1 prikazane su izmjerene vrijednosti jakosti električnog polja, odnosno njihov raspon, za radarske sustave. Radarski signali su impulsno modulirani pa je mjerena i prikazana vršna vrijednost unutar impulsa, kao i vremenski usrednjena efektivnu vrijednost.

U Tablici 2 prikazane su izmjerene vrijednosti jakosti električnog polja, odnosno njihov raspon, za ostale pojedinačne izvore. S obzirom na njihove parametre modulacije, za njih je dovoljno prikazati efektivnu vrijednost polja. Kod sustava s vremenskom podjelom i većim brojem kanala promjenjive vremenske zauzetosti (TETRA, GSM), pretpostavljen je najgori slučaj, odnosno aktivnost svih kanala istovremeno.

Minimalna vrijednost za pojedinu mikrolokaciju i izvor u tablicama odnosi se na postaju na kojoj je izmjereno polje dotičnog izvora bilo manje nego na ostalim postajama na kojima je taj izvor bio prisutan. Obrnuto vrijedi za maksimalnu vrijednost u tablici. Polje općenito varira i unutar mikrolokacije pa se prikazane vrijednosti odnose se na najveću zabilježenu vrijednost pojedinačnog izvora na pojedinoj mikrolokaciji pojedine postaje.

Tablica 1. Izmjerene vrijednosti električnog polja radarskih sustava

	E_{peak} [V/m] (1)		E [V/m] (2)	
Mikrolokacije na postajama:	min.	max.	min.	max.
Operativni centar	10,55	118,11	0,02	0,27
Dnevni boravak	7,24	641,04	0,06	1,17
Spavaona	7,67	641,04	0,01	1,17

(1) vršna vrijednost
(2) vremenski usrednjena efektivna vrijednost

Tablica 2. Izmjerene vrijednosti električnog polja ostalih sustava

Električno polje, *E* [V/m]						
Mikrolokacije:	**Operativni centar**		**Dnevni boravak**		**Spavaona**	
Izvor [(1)]:	**min.**	**max.**	**min.**	**max.**	**min.**	**max.**
FM	0,82	5,22	5,02	8,00	3,37	10,16
VHF	0,27	6,60	0,05	0,72	0,09	0,86
TETRA	0,26	1,35	0,12	1,65	0,07	2,03
GSM	0,65	20,64	0,84	3,56	2,08	25,24

Tablica 3. Granične razine vršnog električnog polja za radarske sustave

Električno polje (vršna vrijednost), *E* [V/m]				
Područje	**RH [1]**	**RH [2]**	**EU, ICNIRP [3-5]**	**NATO [6]**
PPO [(1)]	390	780,8	1952	– [(3)]
PPI [(2)]	1950	1950	4384	200 000

[(1)] PPO – područje povećane osjetljivosti
[(2)] PPI – područje profesionalne izloženosti
[(3)] NATO STANAG [6] propisuje samo granice za profesionalno izlaganje.

Rezultati mjerenja pokazali su da vremenski usrednjeno zračenje radara zadovoljava propise, ali vršna vrijednost od 641 V/m (Tablica 1) koja je izmjerena na jednoj postaji ne zadovoljava hrvatski propis [1] za područja posebne osjetljivosti (Tablica 3). Iz Tablice 3 vidljivo je da je ovaj propis [1] značajno oštriji od ostalih – prema svim ostalim propisima, izmjerena vrijednost je niža od granične razine. Ovoliki raspon graničnih razina za vršnu vrijednost impulsno moduliranog polja (390 V/m do 200 000 V/m) ukazuje na nedovoljno poznavanje učinaka istoga na zdravlje ljudi.

Rezultati mjerenja ostalih izvora pokazali su da na nekim postajama i mikrolokacijama pojedini izvori proizvode značajnu ili čak i previsoku jakost polja. Odašiljač FM postaje ne bi smio proizvesti jakost polja veću od 11,2 V/m, a bazna stanica GSM sustava jakost polja veću od 16,8 V/m na područjima povećane osjetljivosti [1,2]. Stoga je u pojedinim slučajevima potrebno poduzeti mjere zaštite: smanjenje snage odašiljača, premještanje odašiljačke antene ili promjena njenog dijagrama zračenja te, u krajnjem slučaju, ograničenje kretanja i zadržavanja ljudi u ugroženom prostoru.

Zbog velikog broja izvora na postaji, ispitan je i njihov skupni (kumulativni) doprinos izloženosti za svaku mikrolokaciju na svakoj postaji. Analiza je pokazala da su problematični izvori, ondje gdje se pojave, često toliko dominantni da ostali beznačajno pridonose ukupnoj izloženosti. Ova analiza nije prikazana u ovom radu zbog nedostatka prostora.

ZAKLJUČAK

Obalni motritelji na postajama obalnog motrenja izloženi su neionizirajućem zračenju većeg broja izvora. Izloženost nije zanemariva, ali najveći dio situacija i prostora zadovoljava hrvatske pravilnike koji su čak i stroži od međunarodnih smjernica. U nekoliko ekscesnih situacija, pojedinačni izvori se približavaju ili blago prekoračuju propisane granične razine. To ukazuje da je potreban kontinuirani nadzor izloženosti, kako mjerenjem zračenja, tako i zdravstvenim pregledima motritelja.

NAPOMENA

Rezultati istraživanja proizašli su iz projekta mjerenja izloženosti obalnih motritelja elektromagnetskim poljima za potrebe HRM te znanstvenog projekta MZOŠ RH 023-0000000-3273 "Mjerenja u području EMC i istraživanja EM utjecaja na zdravlje".

LITERATURA

[1] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja. Narodne novine 204/2003, 15/2004 i 41/2008.

[2] Pravilnik o ograničenjima jakosti elektromagnetskih polja za radijsku opremu i telekomunikacijsku terminalnu opremu. Narodne novine 183/2004.

[3] European Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) – 1999/519/EC, Official Journal of the European Communities, L 199 of 30 July 1999.

[4] Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). Official Journal of the European Union L 159 of 30 April 2004.

[5] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 Ghz). Health Phys 1998;74(4):494-522.

[6] NATO STANAG 2345 (Edition 3): Evaluation and control of personnel exposure to radio frequency fields – 3 kHz to 300 GHz.

[7] Pravilnik o poslovima s posebnim uvjetima rada, Narodne novine 5/1984.

[8] Garaj-Vrhovac V, Gajski G, Pažanin S, Šarolić A, Domijan AM, Flajs D, Peraica M. Assessment of cytogenetic damage and oxidative stress in personnel occupationally exposed to the pulsed microwave radiation of marine radar equipment. Int J Hyg Environ Health 2010. in press

OCCUPATIONAL EXPOSURE OF COASTAL OBSERVATION STATION PERSONNEL TO NON-IONISING RADIATION

Senijo Pažanin[1] *and Antonio Šarolić*[2]
[1]Naval Medical Institute of the Croatian Navy, Split, Croatia
[2]Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture (FESB), Split, Croatia
spazanin@yahoo.com , antonio.sarolic@fesb.hr

Naval personnel working at coastal observation stations are exposed to non-ionising radiation originating from marine radars and other on-site radiofrequency sources that vary from station to station. The network of observation stations is situated on the highest hills and islands along the Croatian Adriatic coast. In addition to marine radars, radiation sources often include: marine VHF transmitters, mobile radiotelephony (TETRA and GSM) base stations, local FM transmitter etc.

The Naval Medical Institute of the Croatian Navy in Split conducts periodical medical surveys of personnel, with detailed clinical examinations, including general and specific laboratory tests. It also plans and conducts periodic surveys of on-site work conditions. Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture (FESB) in Split conducted electromagnetic field site surveys at observation stations.

Electromagnetic field was measured at each station. All sources were taken into account. Special attention was paid to the measurement of radar signals that were pulse modulated. Both peak and average values of such signals have to be measured and reported. All results were evaluated according to the Croatian bylaws, EU and ICNIRP guidelines and NATO Standardization Agreement.

The measurement results showed that the exposure is not negligible. Most situations and microlocations comply with all prescribed limits. At rare situations, individual sources tend to reach or even slightly exceed the limits, demanding measures for non-ionising RF radiation protection.

Periodical electromagnetic surveys and medical examinations are evidently required to keep the exposure under control.

POKAZATELJI OKSIDACIJSKOG OŠTEĆENJA MAKROMOLEKULA I ANTIOKSIDACIJSKE OBRANE U ISPITANIKA IZLOŽENIH RADARSKOM ZRAČENJU FREKVENCIJA OD 1,5 GHz DO 10,9 GHz

Ana Marija Marjanović[1], Ana-Marija Domijan[2], Dubravka Flajs[1] i Ivan Pavičić[1]
[1]Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
[2]Farmaceutsko-biokemijski fakultet, Zagreb
amarjanovic@imi.hr

UVOD

U ljudskom organizmu svakodnevno dolazi do stvaranja reaktivnih kisikovih spojeva (ROS) čiji učinak ovisno o koncentraciji može biti koristan, ali i štetan. U fiziološkim uvjetima ravnoteže nepovoljni učinci ROS-ova kontrolirani su antioksidacijskom obranom organizma [1]. Uslijed poremećaja ravnoteže u korist ROS-ova, smanjenja antioksidacijske obrane ili oboje javlja se oksidacijski stres [2]. Oksidacijskom oštećenju podložne su stanične makromolekule: proteini, lipidi i nukleinske kiseline. U živom organizmu što zbog kratkog životnog vijeka kao i visoke reaktivnosti, ROS-ove je vrlo teško direktno otkriti. Stoga se promjene koje nastaju na makromolekulama, kao i promjene u antioksidacijskoj obrani često koriste kao biomarker oštećenja [3]. Osim endogenih i egzogeni čimbenici utječu na stvaranje ROS-ova, a među njih ubrajamo i mikrovalno zračenje (Mw) [4]. Mikrovalno zračenje pripada dijelu spektra neionizirajućeg zračenja, a obuhvaća frekvencijski pojas od 300 MGz do 300 GHz. U proteklih nekoliko desetljeća upotreba mikrovalnog zračenja u stalnom je porastu, što se posebno odnosi na područje radarskih i komunikacijskih sustava [5]. Istraživanja vezana uz nepovoljan utjecaj mikrovalnog zračenja na ljudski organizam često su kontradiktorna, a odgovarajući mehanizam djelovanja još uvijek je nepoznat. Neke studije upućuju na povezanost mikrovalnog zračenja s nastankom oksidacijskog oštećenja kao i promjenu u antioksidacijskoj obrani organizma. Kao pokazatelji oksidacijske štete često se odabiru mjerenja razina oksidiranih proteina (protein-karbonila), glutationa (GSH) i malondialdehida (MDA) [4,6-9]. Oksidirani proteini rezultiraju gubitkom funkcionalnosti, povećanom osjetljivošću ili u konačnici denaturacijom, a mjere se određivanjem razine protein-karbonila

[10]. Često spominjani antioksidans u organizmu svakako je sveprisutni tripeptid glutation kojeg u stanici nalazimo u reduciranom obliku ili vezanog za proteine. Reducirani GSH je biološki aktivni oblik, jer kao davatelj elektrona inaktivira slobodne radikale, a time sprečava njihov štetni utjecaj na stanične strukture [11]. Smatra se da je stanična membrana ciljna struktura koja bi mogla biti osjetljiva na Mw zračenje. Stanične membrane bogate su višestruko nezasićenim masnim kiselinama te su stoga podložne oksidacijskom oštećenju. Lipidnom oksidacijom nastaju brojni sekundarni produkti među kojima je svakako najviše proučavani MDA koji se ujedno smatra i biomarkerom oksidacijskog oštećenja [6]. Ovim istraživanjem obuhvaćeno je ispitivanje razina pokazatelja oksidacijskog oštećenja makromolekula i antioksidacijske obrane u krvi muških ispitanika koji su na radnom mjestu izloženi radarskom zračenju frekvencija 1,5 – 10,9 GHz.

MATERIJALI I METODE

Uzorci pune krvi prikupljeni su od 27 zaposlenika koji su bili izloženi mikrovalnom zračenju radara frekvencije 1,5 GHz do 10,9 GHz, gustoće snage električnog polja od 10 $\mu W/cm^2$ do 10 mW/cm^2. Venska krv prikupljena je i pohranjena u heparinizirane vacutainere (BD Vacutainer Tubes, SAD) te odmah potom zamrznuta na -80 ºC. Kontrolna skupina sadržavala je osam odgovarajućih ispitanika. Postupak je odobrilo Etičko povjerenstvo Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada. Ukupni proteini određeni su prema metodi po Bradfordu [12]. Koncentracija GSH u punoj krvi određena je na temelju reakcije s 5,5'–ditiobis-2-nitrobenzoatom (DTNB), a izračunata preko baždarnog dijagrama standarda GSH (Sigma-Aldrich). Standardi GSH dobiveni su razrjeđivanjem matične otopine GSH dobivene otapanjem 25 mg GSH u 25 mL fosfatnog pufera (0,3 M, pH 7,4) (Kemika). U 800 µL pune krvi dodano je 3,2 mL destilirane vode nakon čega su uzorci promiješani. Hidrolizatu krvi (3,5 mL) dodano je 3,5 mL 1 %-tne metafosforne kiseline (Sigma-Aldrich) te su uzorci centrifugirani 10 min pri 3500 × g. Dobiveni supernatant korišten je u postupku mjerenja GSH i MDA. Supernatantu (500 µL) je dodano 300 µL fosfatnog pufera i 50 µL DTNB-a (1 mM), uzorci su kratko promiješani, a apsorbancija (Cecil 9000) je izmjerena pri 412 nm. Koncentraciju MDA odredili smo modifikacijom metode prema Drury i sur. [13]. Iz matične otopine standarda (3,035 mM) priređeni su standardi različitih koncentracija. Supernatantu hidrolizata krvi (200 µL) dodano je 20 µL butiliranog hidroksitoluena (BHT, 0,2%, w/v, Sigma-Aldrich), 750 µL H_3PO_4 (1 %, v/v, Kemika) te 400 µL tiobarbituratne

kiseline (TBA, 0,6 % w/v, Sigma-Aldrich). Uzorci su stavljeni 20 min u vodenu kupelj (100 °C) nakon čega su ohlađeni i analizirani visokoučinkovitom tekućinskom kromatografijon (HPLC, Shimadzu Corporation, Japan). MDA je detektiran pri 532 nm. Koncentracija protein-karbonila određena je modifikacijom metode prema Adams i sur. [10]. Hidrolizatu razrijeđene pune krvi (500 µL) dodano je 500 µL 10 %-tne trikloroctene kiseline (TCA, Kemika). Uzorci su centrifugirani, a na talog je dodano 1 mL 0,2 %-tnog 2,4-dinitrofenilhidrazina (DNPH, Kemika) te su ostavljeni jedan sat u mraku pri sobnoj temperaturi uz povremeno miješanje. Nakon dodavanja 1 mL 10 %-tne TCA uzorci su ponovno centrifugirani. Talog je ispran otopinom etanol:etilacetata, otopljen s 2 mL 6 M guanidina te stavljen u ultrazvučnu kupelj. Apsorbancija je izmjerena pri 400 nm u odnosu na guanidin koji je korišten kao slijepa proba, a koncentracija je izračunata preko molarnog ekstinkcijskog koeficijenta. Rezultati su prikazani kao medijani s minimalnim i maksimalnim vrijednostima. Podaci su analizirani neparametrijskim testom Mann-Whitney U test pomoću statističkog programa Statistica 9.0 (Statsoft, SAD).

REZULTATI

Koncentracije GSH, MDA, oksidiranih i ukupnih proteina u krvi izložene i kontrolne skupine ispitanika prikazani su na Slici 1. Pri tome su vrijednosti GSH (Slika 1a), MDA (Slika 1b) i oksidiranih proteina (Slika 1c) u uzorcima pune krvi prikazani u odnosu na ukupne proteine. Rezultati ukazuju na postojanje značajne razlike u koncentracijama GSH i MDA između izložene i kontrolne skupine. U ozračenih ispitanika nije uočena razlika u koncentraciji oksidiranih proteina. U odnosu na kontrolnu skupinu, nalaz koncentracije GSH kod izložene skupine ispitanika je snižen ($p < 0,05$) dok je koncentracija MDA bila značajno povišena ($p < 0,05$).

ZAKLJUČAK

Biološki pokazatelji oksidacijskog djelovanja mikrovalnog zračenja na ljudski organizam upućuju na mogućnost oštećenja makromolekularnih struktura; proteina i lipida u krvi. Antioksidacijski odgovor, definiran razinom glutationa u krvi muških ispitanika koji su na radnom mjestu izloženi radarskom zračenju frekvencija 1,5 – 10,9 GHz govori u prilog snižene antioksidacijske obrane organizma.

Slika 1. Koncentracija a) GSH, b) MDA, c) oksidiranih proteina, d) ukupnih proteina u izloženoj i kontrolnoj skupini ispitanika izloženih radarskom zračenju frekvencija 1,5 – 10,9 GHz

Zahvala

Zahvaljujem Jedinici za mutagenezu Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada na ustupljenim uzorcima. Rad je izrađen uz potporu projekata 022-0222148-2142 i 022-0222411-2406 Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta.

LITERATURA

[1] Valko M, Rhodes CJ, Moncol J, Izakovic M, Mazur M. Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer. Chem Biol Interact 2006;160:1-40.

[2] Waris G, Ahsan H. Reactive oxygen species: role in the development of cancer and various chronic conditions. J Carcinogen 2006;5:14.

[3] Kohen R, Nyska A. Invited review: oxidation of biological systems: oxidative stress phenomena, antioxidants, redox reactions, and methods for their quantification. Toxicol Pathol 2002;30:620-650.

[4] Møller P, Wallin H, Knudsen L.E. Oxidative stress associated with exercise, psychological stress and life-style factors. Chem Biol Interact 1996;102:17-36.

[5] Porcelli M, Cacciapuoti G, Fusco S, Massa R, d'Ambrosio G, Bertolda C, De Rosa M, Zappia V. Non-thermal effects of microwaves on proteins: thermophilic enzymes as model system. FEBS Lett 1997;402:102-106.

[6] Meral I, Mert H, Mert N, Deger Y, Yoruk I, Yetkin A, Keskin S. Effects of 900 MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on brain oxidative stress and some vitamin level of guinea pigs. Brain Res 2007; 1169:120-124.

[7] Ilhan A, Gurel A, Armutcu F, Kamisli S, Iraz M, Akyol O, Ozen S. Ginkgo biloba prevents mobile phone-induced oxidative stress in rat brain. Clin Chim Acta 2004;340:153-162.

[8] Moustafa Y.M, , Moustafa R.M, Belacy A, Soad H, El-Ela A, Ali F.M. Effects of acute exposure to the radiofrequency fields of cellular phones on plasma lipid peroxide and antioxidase activities in human erythrocytes. J Pharm Biomed Anal 2001;26:605-608.

[9] Dalle-Donne I, Rossi R, Giustarini D, Milzani A, Colombo R. Protein carbonyl groups as biomarkers of oxidative stress. Clin Chim Acta 2003; 329:23–38.

[10] Adams S, Green P, Claxton R, Simcox S, Williams M.V, Walsh K, Leeuwenburgh C. Reactive carbonyl formation by oxidative and non-oxidative pathways. Front Biosci 2001;6:17-24.

[11] Perricone C, De Carolis C, Perricone R. Glutathione: a key player in autoimmunity. Autoimmun Rev 2009;8:697-701.

[12] Bradford M.M. A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. Anal Biochem 1976;72:248-254.

[13] Drury J.A, Nycyk J.A, Cooke R.W.I. Comparison of urinary and plasma malondialdehyde in preterm infants. Clin Chim Acta 1997;263:177-185.

INDICATORS OF MACROMOLECULAR OXIDATIVE DAMAGE AND ANTIOXIDANT DEFENCE IN EXAMINEES EXPOSED TO THE RADAR FREQUENCIES 1.5 – 10.9 GHz

Ana Marija Marjanović[1], Ana-Marija Domijan[2], Dubravka Flajs[1] and Ivan Pavičić[1]
[1]Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
[2]Faculty of Pharmacy and Biochemistry, Zagreb, Croatia
amarjanovic@imi.hr

Radar is an object-detection system which uses microwaves (Mw). As a result of increased use of radar there is a rising concern regarding health effects of Mw radiation on human body. Living organisms are complex electrochemical systems being evolved in a relatively narrow range of well-defined environmental parameters. For life to be maintained these parameters must be kept within their normal range, since deviations can induce biochemical effects causing cell function impairment and disease. Some theories indicate connection between Mw radiation, oxidative damage as well as antioxidant defence of organism. Aim of this study was to evaluate level and damage of macromolecular structures – proteins and lipids in blood of men occupationally exposed to Mw radiation. Concentration of glutathione (GSH), a known indicator of organism antioxidant defence, was also determined. Blood samples were collected from 27 male workers occupationally exposed to radar frequencies 1.5 to 10.9 GHz. Corresponding control group (N = 8) was a part of study. Concentrations of total and oxidised proteins, protein carbonyls, and GSH were measured by spectrophotometric method, while malondialdeyde (MDA), product of lipid peroxidation, was determined by high performance liquid chromatography (HPLC). Gained concentrations of oxidised proteins, GSH and MDA were presented in relation to total proteins. Concentration of oxidised proteins between control and exposed group of examinees did not show any significant statistical difference. However, concentration of GSH in exposed group was found considerably decreased, while concentration of MDA was found to be increased. Results indicate that Mw radiation of radar operating at frequencies 1.5 – 10.9 GHz could cause damage to proteins and lipids in addition to impairment of antioxidant defence of organism.

USPOREDBA DJELOVANJA GSM MODULIRANOG I NEMODULIRANOG RADIOFREKVENCIJSKOG ZRAČENJA NA STANICE

Ivan Pavičić, Ana Marija Marjanović i Ivančica Trošić
Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb
ipavicic@imi.hr

UVOD

Zadnjih godina u porastu je korištenje uređaja koji generiraju radiofrekvencijsko (RF) elektromagnetsko (EM) zračenje. Naročito je izražen porast korištenja uređaja iz sustava mobilne telefonije. Postupnim pojeftinjenjem uređaja postalo je uobičajno posjedovati barem jedan ako ne i više mobilnih telefona. Sveprisutnost tih uređaja nameće pitanje mogu li ti uređaji utjecati na biološku jedinku. Dosadašnja istraživanja nisu ukazala na jednoznačnu predodžbu o postojanju biološkog potencijala RF zračenja [1]. *In vivo* istraživanja bioloških pokazatelja djelovanja RF zračenja ukazala su na moguć i izgledan utjecaj na rast, razvoj i sazrijevanje stanica krvotvornog tkiva uključujući tvorbu mikronukleusa i multinuklearnih makrofaga [2-7]. Isto tako, u *in vitro* istraživanjima RF zračenja utvrđen je mogući utjecaj na različite dijelove stanice [8-10]. Svrha ovog rada je utvrditi i usporediti djelovanja GSM modulacije koja se koristi u mobilnoj telefoniji (GSM) i nemoduliranog (CW) RF EM zračenja na osnovne parametre rasta stanica u kulturi.

MATERIJALI I METODE

U istraživanju su korišteni fibroblasti kineskog hrčka, soj V79. Stanice su izlagane 1, 2 i 3 sata GSM moduliranom i CW EM polju. Ozračeni i odgovarajući kontrolni uzorci stanica držani su u kontroliranim uvjetima na 37 °C, u atmosferi s 5 % CO_2 i visokim postotkom vlage. Jakost električnog polja GSM modulacije i frekvencije 915 MHz iznosila je (10,0 ± 0,5) V/m. U CW EM polju određena je frekvencija od 935 MHz i jakosti od (8,2 ± 0,3) V/m. Stanice su bile izložene zračenju u certificiranoj gigahercnoj transverznoj elektromagnetskoj (GTEM) komori. Izvor signala GSM modulacije bio je generator signala Antrisu 2721B s pojačalom RF 3146 (RF Micro Devices, SAD) i modulatorom RF 2722 (RF Micro Devices, USA), a izvor CW bio je signalni generator Hewlett Packard

HP8657A. U svrhu dobivanja vrijednosti specifične brzine apsorpcije (SAR) za živu stanicu procijenjene su vrijednosti dielektričnih osobina staničnih komponenata u skladu s njihovim pojedinačnim volumnim udjelom [11]. Prosječni SAR je iznosio 0,23 W/kg za RF zračenje GSM modulacije te 0,12 W/kg za CW zračenje. Rast stanične kulture započeo je sadnjom 1×10^4 stanica po mililitru medija RPMI 1640 (Sigma Chemicals, SAD). Tijekom pet dana rast se odredio brojanjem stanica nakon svakih 24 sata nakon zračenja pomoću svjetlosnog mikroskopa [12]. 24 sata nakon nasadnje, stanice su izlagane 1, 2 i 3 sata GSM i CW RF polju. Vijabilnost stanica određena je pomoću Tripan Blue testa. Omjer između mrtvih i živih stanica utvrđen je neposredno nakon izlaganja i tijekom svih pet dana trajanja pokusa [12]. Rezultati su prikazani kao medijani s minimalnim i maksimalnim vrijednostima. Podaci su analizirani neparametrijskim Mann-Whitney testom uz pomoć statističkog programa Statistica 9.

Slika 1. Rast V79 stanične kulture tijekom 5 dana nakon 1, 2 i 3 h izlaganja GSM moduliranom RF polju frekvencije 915 MHz i jakosti polja 10 V/m (* $p < 0,05$)

REZULTATI

Stanični rast nakon 1, 2 i 3 sata izlaganja 915 MHz GSM moduliranom i 935 MHz CW RF polju prikazan je na Slikama 1 i 2.

Statistički značajni pad ($p < 0,05$), u odnosu na odgovarajuće kontrolne uzorke, kod ukupnog broja stanica izloženih polju GSM moduliranom RF zračenju frekvencije 915 MHz primijećen je drugog i trećeg dana u uzorcima zračenim 3 sata. Primjenom polja frekvencije 935 MHz na kulturu stanica u trajanju od 3 sata, u odnosu na kontrolne stanične uzorke, nađen je značajni pad ($p < 0,05$) u broju stanica treći dan nakon zračenja. Vijabilnost staničnih kultura izloženih RF poljima različite modulacije kretala se u fiziološkom rasponu od 90 – 100 % živih stanica za sve vremenske periode zračenja te se nije razlikovala od kontrolnih uzoraka. Svaka točka na grafikonima predstavlja srednju vrijednost dobivenu iz šest odvojenih staničnih uzoraka.

Slika 2. Rast V79 stanične kulture tijekom 5 dana nakon 1, 2 i 3 h izlaganja CW RF polju frekvencije 935 MHz i jakosti polja 8,2 V/m (* $p < 0,05$)

ZAKLJUČAK

Oba primijenjena EM zračenja utjecala su na rast, ali ne i na vijabilnost korištene stanične kulture. Primijenjeno zračenje GSM modulacije pokazalo je značajniji učinak u odnosu na nemodulirano zračenje, što upućuje na mogućnost djelovanja modulacije EM vala na rast i razvoj stanica u kuluri.

Zahvala

Rad je izrađen uz financijsku potporu projekta 022-0222411-2406 "Biološki pokazatelji djelovanja elektromagnetskog neionizirajućeg zračenja" Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH.

LITERATURA

[1] Ruediger H W. Genotoxic effects of radiofrequency electromagnetic fields. Pathophysiology 2009;16(2-3):89-102.

[2] Trosic I, Busljeta I, Pavicic I. Blood-forming system in rats after whole-body microwave exposure: reference to the lymphocytes. Tox Lett 2004;154:125-32

[3] Trošić I, Bušljeta I, Modlic B. Investigation of the genotoxic effect of microwave irradiation in rat bone marrow cells: *in vivo* exposure. Mutagenesis 2004;19(5):361-364.

[4] Trošić I, Bušljeta I, Kašuba V, Rozgaj R. Micronucleus induction after whole-body microwave irradiation of rats. Mutat Res 2002;521;73-79.

[5] Trošić I, Bušljeta I. Frequency of micronucleated erythrocytes in the rat bone marrow exposed to 2.45 GHz radiation. Physica scripta 2005;T118: 168-170.

[6] Trošić I, Bušljeta I, Pavičić, I, Milković-Kraus S. Nocturnal urinary melatonin levels and urine biochemistry in microwave-irradiated rats. Biologia 2009;64(4):798-802.

[7] Busljeta I, Trosic,I, Milkovic-Kraus S. Erythropoietic changes in rats after 2.45 GHz nonthermal irradiation. Int J Hyg Environ Health. 2004;207:1-6.

[8] Pavičić I, Trošić, I. In vitro testing of cellular response to ultra high frequency electromagnetic field radiation. Toxicol in Vitro 2008;22(5):1344-1348.

[9] Trošić I, Pavičić, I. Cell proliferation disturbances in response to the mobile phone frequency radiation. Arh Hig Rada Toksikol 2009;60:109-115.

[10] Pavičić I, Trošić I. Impact of 864 MHz or 935 MHz radiofrequency microwave radiation on the basic growth parameters of V79 cell line. Acta Biol Hung 2008;59(1):67-76.

[11] Steffensen KV, Raskmark P, GF Penersen, FDTD calculations of the EM-field distribution in a microtiter suspension well, COST 244: Biomedical Effects of Electromagnetic fields, Kuopio, Finska. 1995;80-87.

[12] Freshney RI. Culture of animal cells, 4 izdanje, NY, USA, Willey-Liss Press, 2000. ISBN 0-471-34889-9.

COMPARISON OF GSM MODULATED AND CW RADIOFREQUENCY RADIATION ON CELLS

Ivan Pavičić, Ana Marija Marjanović and Ivančica Trošić
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
ipavicic@imi.hr

The aim of our study was to evaluate and compare effect of global system of mobile (GSM) modulation and continuous wave (CW) radiofrequency radiation (RF) on proliferation ability and viability of V79 Chinese hamster lung cells. Previously prepared samples of cells in culture were exposed for 1, 2 and 3 hours both to 915 MHz GSM modulated and to 935 MHz CW RF field in gigahertz transversal electromagnetic mode cell (GTEM-cell). Electric field strength for cells exposed to GSM modulation was set at 10 V/m and for CW exposed cells was 8.2 V/m. Average specific absorption rate (SAR) was calculated to be for GSM 0.23 W/kg and for CW 0.12 W/kg. V79 samples were plated in concentration of 1×10^4cells/mL. Cell proliferation was determined by cell counts for each hour of exposure during five post-exposure days. Trypan blue exclusion test was used to determine cell viability. In comparison to control cell samples, proliferation of GSM irradiated cells showed significant decrease after 3 hours of exposure on the second and third post-exposure day. CW exposed cell samples showed significant decrease after 3 hours of exposure on the third post-exposure day. Viability of GSM and CW exposed cells did not significantly differ from matched control cell samples. Both applied RF fields have shown similar effect on cell culture growth, and cell viability of V79 cell line. In addition, applied GSM modulated RF radiation demonstrate bigger influence on proliferation of cells.

RADIOPROTECTION OF WISTAR RAT LYMPHOCYTES AGAINST MICROWAVE RADIATION MEDIATED BY BEE VENOM

Vera Garaj-Vrhovac and Goran Gajski
Institute for Medical Research and Occupational Health, Zagreb, Croatia
vgaraj@imi.hr , ggajski@imi.hr

INTRODUCTION

Microwave radiation is a type of non-ionising electromagnetic radiation present in the environment, and is a potential threat to human health. Today, non-ionising radiation has increasingly been used in industry, commerce, medicine, and for private purposes, especially in mobile telephone usage. Although average exposure levels are low compared to exposure limits, there is a growing public concern about the potential hazard of exposure to these frequencies for human health [1-3]. Cytogenetic studies of microwave radiation were conducted *in vitro* and *in vivo*, and have yielded contradictory and often intriguing experimental results. Some reports suggest that exposure of human cells to radiofrequency radiation does not result in increased cytogenetic damage. On the other hand, there is a range of studies showing that radiofrequency radiation can indeed induce genetic alteration after exposure to electric field. In addition to experiments with human cells, a number of studies have been conducted on animal models. These studies have also given contradictory results regarding exposure to microwave [4-6].

Bee venom is used in traditional medicine to treat variety of conditions, such as arthritis, rheumatism, back pain and skin disease. In recent years it has been reported that bee venom possesses antimutagenic, proinflammatory, anti-inflammatory, antinociceptive, and anticancer effects. In addition to the wide range of the bee venom's activities, it also possesses a radioprotective capacity that was noted against X-ray and gamma radiation in various test systems [7,8].

Because of the lack of conclusive data on the genotoxic status induced by microwave radiation, the aim of the present study was assessment of the radioprotective effect of bee venom against 915 MHz microwave radiation-induced DNA damage in the Wistar rat's lymphocytes *in vitro*. The possible genotoxic effect of bee venom alone was also assessed on non-irradiated

lymphocytes. For that purpose the alkaline comet assay was used as a sensitive tool in detection of DNA damage. In addition to the standard protocol for the comet assay, the Fpg-modified comet assay was also used as a much more sensitive and specific technique in detection of DNA strand breaks and oxidative stress.

MATERIAL AND METHODS

Adult male Wistar rats (11 weeks old, approximate body weight 350 g) were used in this study. The animals had passed through an accommodation period of 1 week. The animals were kept in steady-state microenvironment conditions, (22 ± 1) °C, and received standard laboratory food and water *ad libitum*, with alternating 12 h light and dark cycles. The whole blood samples were collected by cardiac puncture under sterile conditions in heparinized vacutainer tubes (Becton Dickinson, USA) containing lithium heparin as anticoagulant. After collection, blood was divided into 1 ml aliquots and placed into 24-well culture plates according to the exposure conditions.

Lyophilized bee venom was dissolved in sterile redistilled water at 25 ºC and centrifuged at 12,000 rpm for 10 min to remove insoluble materials. Bee venom was added to lymphocyte cultures in final concentration of 1 µg/ml, 4 h prior to irradiation and immediately before irradiation. To test whether this concentration alone induces genotoxic effect lymphocytes were treated under the same conditions with bee venom in corresponding time periods. All experiments were conducted on whole blood samples at 37 ºC in an atmosphere of 5 % CO_2 in air.

An electromagnetic field was generated within the certified gigahertz transversal electromagnetic mode cell (GTEM-cell, USA). Whole blood was exposed to the carrier frequency of 915 MHz with GSM basic signal modulation for 30 minutes. Incident electromagnetic field strength of 30 V/m was uniform over the entire biological object throughout the exposure procedure. The power density of the field was 2.4 W/m^2, corresponding to approximate whole body specific absorption rate (SAR) of 0.6 W/kg [9].

The comet assay was carried out under alkaline conditions, as described by Singh et al. [10] whereas the analysis of 8-oxo-7, 8-dihydro-2'-deoxyguanozine (8-oxodG) was performed using an Fpg FLARE™ assay kit (Trevigen Inc, USA). Statistical analysis was performed using Statistica 5.0 package (StaSoft, USA). The level of statistical significance was set at $P < 0.05$.

RESULTS

According to one-way ANOVA only parameter for tail length showed significant deviation from normal distribution in the alkaline comet assay. In the Fpg-modified comet assay all three parameters (tail length, tail intensity and tail moment) showed significant deviation from normal distribution for irradiated sample. When comparing mean values between different samples in both comet tests, difference was higher when the Fpg-modified comet assay was applied. All three parameters of the Fpg-modified comet assay showed statistically significant differences between irradiated group as compared to the control, to the BV treatment and to the MW/BV treatment groups (Figures 1 and 2).

Figure 1. Parameters of the alkaline comet assay (tail length, tail intensity and tail moment) measured in Wistar rat lymphocytes of controls, after exposure to microwave radiation (MW, 915 MHz), after treatment with bee venom (BV, 1 μg/ml) and after joint MW/BV treatment.

a – statistically significant difference as compared to the control; b – statistically significant difference as compared to the BV treatment; c – statistically significant difference as compared to the MW/BV treatment; level of statistical significance was set at $P < 0.05$

When the standard comet assay was applied, the mean tail length for irradiated sample differed significantly from non-treated control samples, BV-treated samples, and from MW/BV-treated samples. For tail intensity and tail moment there was no significant difference found between the

control sample, and samples treated only with BV or with MW/BV. In the Fpg-modified comet assay all three parameters differed significantly from non-treated control samples, BV-treated samples, and from MW/BV-treated samples. Generally, the means and medians of all three standard comet assay parameters were lower than of the Fpg-modified comet assay. These findings suggest that the Fpg-modified comet assay is more sensitive to the effects of microwave radiation than the standard comet assay.

Figure 2. Parameters of the Fpg-modified comet assay (tail length, tail intensity and tail moment) measured in Wistar rat lymphocytes of controls, after exposure to microwave radiation (MW, 915 MHz), after treatment with bee venom (BV, 1 µg/ml) and after joint microwave MW/BV treatment.
a – statistically significant difference compared to the control; b – statistically significant difference compared to the BV treatment; c – statistically significant difference compared to the MW/BV treatment; The level of statistical significance was set at $P < 0.05$

CONCLUSION

Results obtained by the Fpg-modified comet assay suggest that oxidative stress can be the cause for DNA damage in Wistar rat lymphocytes in addition to some basal DNA damage detected with the standard alkaline comet assay after exposure to 915 MHz microwave radiation *in vitro*. Bee venom in this study demonstrated radioprotective effects against low level of microwave radiation when administered prior to the radiation exposure and immediately before irradiation. This study also demonstrated that bee venom has radioprotective effect against basal and

oxidative DNA damage. Furthermore, bee venom itself has no effect on induction of DNA breaks or on oxidative stress in the low concentrations used in this research. A combination of the standard and the Fpg-modified comet assay has proven usefulness in detecting genotoxicity of microwave radiation and radioprotection of bee venom.

Acknowledgment

The study was supported by the Croatian Ministry of Science, Education and Sports (grant 022-0222148-2125). The authors thank Radiation Dosimetry and Radiobiology Unit, Institute for Medical Research and Occupational Health for the opportunity to use the GTEM-cell in this experiment.

REFERENCES

[1] Roberts NJJr, Michaelson SM, Lu ST. The biological effects of radio-frequency radiation: a critical review and recommendations. Int J Radiat Biol Relat Stud Phys Chem Med 1986;50:379-420.

[2] Breckenkamp J, Berg G, Blettner M. Biological effects on human health due to radiofrequency/microwave exposure: a synopsis of cohort studies. Radiat Environ Biophys 2003;42:141-154.

[3] Jauchem JR. Effects of low-level radio-frequency (3kHz to 300GHz) energy on human cardiovascular, reproductive, immune, and other systems: a review of the recent literature. Int J Hyg Environ Haelth 2008;211:1-29.

[4] Brusick D, Albertini R, McRee D, Peterson D, Williams G, Hanawalt P, Preston J. Genotoxicity of radiofrequency radiation. Environ Mol Mutagen 1998;32:1-16.

[5] Verschaeve L. Genetic damage in subjects exposed to radiofrequency radiation. Mutat Res 2009;681:259-270.

[6] Verschaeve L, Juutilainen J, Lagroye I, Miyakoshi J, Saunders R, de Seze R, Tenforde T, van Rongen E, Veyert B, Xu Z. *In vitro* and *in vivo* genotoxicity of radiofrequency fields. Mutat Res 2010;705:252-268.

[7] Son DJ, Lee JW, Lee YH, Song HS, Lee CK, Hong JT. Therapeutic application of anti-arthritis, pain-releasing, and anti-cancer effects of bee venom and its constituent compounds. Pharmacol Ther 2007;115:246-270.

[8] Varanda EA, Tavares DC. Radioprotection: Mechanism and radioprotective agents including honey bee venom. Venom Anim Toxins 1998;4:5-21.

[9] Durney CH, Massoudi H, Iskander MF. Radiofrequency radiation handbook. 4th edition. Report SAM-TR-85-73, Brooks Air Force Base, Texas, USAF School of Aerospace Medicine, 1986.

[10] Singh NP, McCoy MT, Tice RR, Schneider LL. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. Exp Cell Res 1988;175:184-191.

POPIS AUTORA

AUTHOR INDEX

A

Ajanović A. **148**
Allott R. 455
Anđelić T. 418
Angelini S. 123
Antović N. 418
Aranđić D. 276

B

Babić D. **71**, 437
Bagarić R. 257
Bakhanova E. 3
Barešić J. 347, 387, **461**
Barišić De. 399
Barišić Do. 449
Beck N. 129, **287**
Belamarić N. 31
Benković V. **167**
Benedik L. 393, 399
Bessieres I. 303
Bešlić I. 196, 355
Bibić J. 106
Bituh T. 191, **443**
Blažeković B. 173
Böhm K. 282
Bokulić T. **113**, 309
Bordy J.-M. 303
Branica G. 60, 183, **375**
Brecelj E. 489
Breznik B. 341, 347
Brnić Z. 263, **269**, 292
Bubalo D. 449
Budanec M. 113, 309

C

Chumak V. **3**
Ciglar M. 251
Ciraj-Bjelac O. **276**
Copplestone D. **455**
Csige I. 82, 226

Č

Čačković M. **368**
Čamilović D. 94
Čemažar M. 489
Čenčur Curk 243

D

d'Errico F. 303
D'Agostino E. 303
di Fulvio A. 303
Diklić A. 316, 323
Dodig D. 251
Domijan A.-M. 513
Domingo C. 303
Dorić V. 501
Dumani S. 203

Đ

Đikić D. 167
Đurašević M. 468, **474**

E

Edhemović I. 489

F

Faj D. 31, 316, 330
Flajs D. 513
Franić Z. **21**, 60, 183, 191
Franulović I. **191**
Fröbe A. 113, 309
Fujiyoshi R. 243

G

Gadžijev E. 489
Gajski G. **129**, 524
Galjanić S. 21
Gamulin M. **298**
Garaj-Vrhovac V. 129, **524**
Gavila F. M. **480**
Gerić M. 129
Gottstein Ž. 161
Gradaščević N. **411**
Gregorič A. **238**, 243
Grgić M. 298

H

Hanžek B. **60**
Harrison R. 303
Hasanbašić D. 148
Hasani F. 203
Hebrang A. 292
Hodolli G. 203
Horvat-Knežević A. 167
Horvatinčić N. 347, **387**, 461
Hrelia P. 123
Hršak H. 106

I

Ivković A. 316, 330
Ivković I. 214

J

Janković M. 405
Jovanovič P. **209**
Jovičić D. 142
Jurišić D. 214
Jurković S. **316**, 323, 330

K

Kadiri S. **203**
Kandić A. **468**, 474
Kasabašić M. 316, **330**
Kašuba V. 123
Kezić N. 449
Klasić B. **263**, 269, 292
Knežević Ž. 82, 129, 287, 292, 303
Kopjar N. **134**, 167, 173
Kosalec I. 173
Košutić D. 276, 405
Kovač J. 183, 355, 362
Kovačević M. 276
Kovačević N. 54, **106**
Kožar-Logar J. 461
Krajcar Bronić I. 347, 387, 461
Kralik I. 31
Kraljević P. **155**, 161
Križanec D. 21
Križman M. J. **424**
Kubelka D. **31**, 123
Kusić Z. 113, 309

L

Lisičić D. 167

LJ

Ljevar A. 269

M

Magjarević R. 54
Marjanović A. M. **513**, 519
Marović G. **183**, 191, 196, 368, 375, 437, 443

Marinković O. 142
Matišić D. 155
Mazija H. 161
Medvedec M. **54**
Meštrović T. 88
Mihalj A. 411
Mihaljević M. 148
Miklavčić I. 100, 214, 220, 232
Milić M. **123**, 173
Milković Đ. 129, 287
Milošević Z. 468, 474
Miljanić S. 129, 155, 161, 287, **303**
Mirkov Z. 142
Mócsy I. 82, **226**
Mrčela I. 113, **309**

N

Néda T. 226
Nikodemová D. **282**
Nikolić J. 405
Nikolić N. 495
Nodilo M. **48**, 449
Novosel N. 31, **39**

O

Obelić B. **347**, 387, 461
Obu K. **243**
Olko P. 303
Omahen G. **15**
Oršolić N. 167
Osvay M. **77**

P

Paar D. 232
Pajić J. 142
Pavičić I. 513, **519**
Pavičić-Hamer D. **381**
Pažanin S. **507**
Pehnec G. **355**, 362
Peratta A. 501
Peratta C. 501
Petković T. 48
Petrinec B. 443
Planinšek P. 431
Pllana X. 203
Poje M. 214, 220, 232
Poljak D. **501**
Popić-Ramač J. 263, 269, **292**
Popijač M. 449
Poropat M. **251**
Posedel D. 88, 263
Prlić I. 88, 134, 443
Prpić H. **257**
Prokić V. 142

R

Radolić V. **94**, **100**, 214, **220**, **232**
Rafajlović S. 276
Rajevac V. 330
Rajtarić A. 347
Rakić B. **142**
Ramić S. 134
Ranogajec-Komor M. **82**, 129, 226, 287
Rogić M. **393**, 399, 449
Rojc J. 424
Rozgaj R. 123
Rožmarić Mačefat M. 393, **399**, **449**
Rukavina D. 148

S

Sakuta Y. 243
Samek D. 411
Saračević L. 411
Senčar J. 183, 196, 368, 375, 443
Serša G. **489**
Silari M. 303
Sironić A. 347, 387, 461
Skoko B. **437**
Smerajec M. 243
Smilović Radojčić Đ. 316, **323**
Smodiš B. 431
Snoj M. 489
Sofić E. 148
Soldić Ž. 309
Stanić D. 94, 100, 220, 232
Stanić I. 100
Stibilj V. **341**
Stolarczyk L. 303
Surić Mihić M. **88**
Svečnjak L. 449
Svetek B. 341
Sviličić N. 31
Svrkota R. 418
Szacsvai K. 226

Š

Šarolić A. 501, 507
Šega K. **196**
Šegvić Klarić M. **173**
Šešlak B. 468, 474
Šimpraga M. 155
Šiško J. 88
Šobat H. 330
Šoštarec-Crnić M. 263
Štrok M. 393, **431**
Švabić M. 316, 323
Švarc A. 257

T

Tanatarec B. **495**
Tečić Z. 31
Težak S. 251
Todorović D. **405**
Trkov Z. 341
Trošić I. 519

V

Vađić V. 355, **362**, 368
Varga Pajtler M. **214**, 220
Vaupotič J. 238, 243
Vekić B. 113, 257
Vicković I. 437
Vilić M. 155, **161**
Višković K. 263
Vladimir-Knežević S. 173
Volčanšek A. 341, 347
Vukanac I. 468, 474
Vukić V. 31
Vukotić P. **418**
Vuković B. 214, 220, 232

Z

Zdešar U. 15
Zekić R. 418

Ž

Želježić D. 134
Žužul S. 368

VERN
VELEUČILIŠTE

Hrvatska pošta

Jamnica

FOTO BADROV
Jer Vi zaslužujete više!

F&J SPECIALTY PRODUCTS, INC.
THE NUCLEUS OF QUALITY AIR MONITORING PROGRAMS
CE
F&J
Tel: 352.680.1177 / Fax: 352.680.1454
Email: fandj@fjspecialty.com / Web: www.fjspecialty.com
CD Style Digital Calibrator
DF-60810E
Ambient Air Monitoring System
DF-AB-40L
Emergency Response Air Sampler
Filter Media
MCE Membrane Assortment
Glass Fiber
Qualitative and Quantitative Media
DF-1E
Portable Low volume Air Sampler with Digital Flowmeter
Radioiodine Collection Filter Cartridges